

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE  
INGENIEROS INDUSTRIALES



PROYECTO FIN DE CARRERA  
CARACTERIZACIÓN DE LA COCINA  
SOLAR PRIMROSE

Alumna: ANA PIZARRO MENAYO

Director: ANTONIO LECUONA NEUMANN

MAYO 2010



# CARACTERIZACIÓN DE LA COCINA SOLAR TIPO PRIMROSE

## ÍNDICE .....

1.	RESUMEN .....	3
2.	INTRODUCCIÓN .....	4
	<i>El Sol, fuente de energía</i> .....	4
	Movimientos Sol – Tierra .....	4
	La distancia Tierra-Sol .....	5
	Posición del sol .....	6
	Naturaleza de la radiación solar .....	7
	<i>Usos posibles y aplicaciones de la energía del Sol</i> .....	8
	<i>La crisis de la leña.</i> .....	10
	Problemas asociados .....	11
	<i>El uso del Sol para cocinar. La cocina solar.</i> .....	13
3.	HISTORIA Y ESTADO DEL ARTE .....	15
	<i>Historia de la evolución de las cocinas solares</i> .....	15
	<i>Estado del arte</i> .....	16
	Cocinas de panel .....	17
	Hornos solares o cocinas de caja .....	17
	Cocinas de concentración o reflectantes .....	18
	Cocinas solares indirectas o de colectores .....	20
	<i>Comparación</i> .....	21
	<i>La cocina Primrose</i> .....	23
	<i>Situación actual de las cocinas solares</i> .....	24
	Formas de cocinar .....	25
	<i>Características que influyen en el funcionamiento de la cocina solar</i> .....	26
4.	OBJETIVOS .....	28
5.	MEDICIONES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	29
	<i>Descripción y características de la cocina</i> .....	29
	6.1 Estudio experimental .....	30
	6.2 Estudio teórico .....	31
	1.Hipótesis de trabajo .....	31
	2.Potencia de calentamiento .....	35
	3.Temperatura de estancamiento .....	41
	4.Coeficiente de transferencia de calor por pérdidas .....	45
	▪ Tiempo característico de enfriamiento. ....	47
	▪ Factor de pérdidas, o Coeficiente de transferencia de calor por pérdidas ..	50
	5.Eficiencia óptica .....	50
	6.Figuras de mérito .....	53
	7.Tiempo de ebullición .....	57
	8.Rendimiento .....	58
	<i>Análisis de resultados</i> .....	60
	Comparación de la potencia máxima .....	60
	Comparación de las normas India y Europea .....	61
	Comparación de días soleado y nublado .....	63



Comparación de resultados con agua y aceite	65
Comparación de resultados en la cocina con tapa y sin tapa	67
Evolución general de los experimentos	70
<b>6. CONCLUSIONES.</b>	<b>73</b>
<i>Trabajos futuros</i>	74
<b>7. ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO</b>	<b>77</b>
<b>8. ANEXOS</b>	<b>79</b>
ANEXO 1: INSTRUCCIONES DE MONTAJE Y MANUAL DE USO	79
ANEXO 2: NORMA AMERICANA	82
ANEXO 3: NORMA INDIA	84
ANEXO 4: NORMA EUROPEA	85
ANEXO 5: CÁLCULOS	86



## **1. RESUMEN**

---

Este proyecto desarrolla el proceso de caracterización de una cocina tipo Primrose. Aún siendo ésta una cocina comercial, cabe destacar que no se ha encontrado que esté caracterizada.

De forma introductoria, se exponen aspectos básicos relacionados con las cocinas solares. Presentando tanto la energía que utilizan, que es Sol; como de la energía que pretenden reemplazar, que es la leña como combustible. Se introduce una reseña histórica, desde la primera creación, hasta los desarrollos actuales de cocinas solares, ampliando en detalle esta actualidad de cocinas solares mostrando el estado del arte de una forma comparativa.

- Se realiza el ensayo de la cocina Primrose de forma experimental en la Universidad, definiendo una campaña de recogida de datos en los meses de verano del año 2009. Los registros de temperatura muestreados han sido realizados cambiando las condiciones de ensayo para poder evaluar la influencia que ejercían cada una de esas condiciones en la evolución de la temperatura.

- se ha alternado el fluido de trabajo, ensayando con agua y aceite
- se ha utilizado en ocasiones y prescindido en otras de una tapadera para la olla
- se ha experimentado en días soleados, así como en días con peores condiciones atmosféricas
- se han seguido las pautas especificadas en las distintas normas estándares de caracterización

- Aunando estos valores y los que aporta la estación meteorológica situada en la misma localización, se completa una base de datos a partir de la cual realizar un desarrollo teórico:

- Este desarrollo se apoya en ecuaciones básicas de termodinámica, así como en estándares elaborados específicamente para la caracterización de cocinas solares. Los aspectos característicos que resulta conveniente conocer del comportamiento térmico de la cocina son: la potencia de calentamiento, la temperatura de referencia, el coeficiente de transferencia de calor por pérdidas, el tiempo característico de enfriamiento, la eficiencia óptica, el tiempo de ebullición, el rendimiento, así como parámetros específicos descritos en las normas como la potencia normalizada por el estándar americano, o las figuras de mérito de la norma india que representan: una, la eficiencia óptica con respecto a las pérdidas, y la otra el factor de eficiencia del intercambio de calor.

- Alcanzados los resultados, se analizan de forma crítica y se intentan explicar las anomalías observadas al igual que las tendencias.

Con este estudio se sacan conclusiones de los resultados obtenidos, de los aciertos o errores cometidos en el estudio y se proponen los resultados más fiables como valores aptos para la caracterización de la cocina. De igual manera, se plantean conclusiones a cerca de la necesidad de progreso y difusión de las cocinas.

## **2. INTRODUCCIÓN**

La alimentación es un proceso necesario para la supervivencia de cualquier ser vivo. En la actualidad existen diversas maneras de cocinar los alimentos. El proceso de cocinado se basa en elevar la temperatura de los alimentos para que adquieran las propiedades necesarias y de esta manera poder ser ingeridos y nos aporten los nutrientes esperados.

Las cocinas solares se sirven de la utilización del Sol para conseguir el calentamiento necesario para cocinar, y suponen un avance en nuevos usos tecnológicos a partir de energías renovables como en este caso es el Sol. Facilita además el acceso a nuevas energías, rentables para las comunidades más desfavorecidas económica y energéticamente, así como, consecuentemente, para el medio ambiente, reduciendo los riesgos que conlleva asociados la utilización de la leña, combustible doméstico principal de dichas comunidades, el cual se pretende sustituir.

### ***El Sol, fuente de energía***

El Sol es una estrella que se encuentra en el centro del Sistema Solar. Es la fuente de la mayor parte de la energía sobre la Tierra. Fuente de alimentación de las plantas por medio de la fotosíntesis, proceso gracias al cual se convierte la energía de la radiación solar en energía química, la causa de los flujos atmosféricos y del agua, el origen de la luz y el calor que hace posible la vida. Nada existiría sin él. Así mismo, la mayoría de las fuentes de energía usadas por el hombre derivan indirectamente del Sol.

Esta energía se produce en el núcleo del Sol debido a las grandes presiones a las que se encuentra sometido. Estas enormes presiones se generan debido a la densidad del material en su núcleo y a las enormes temperaturas que se dan en él gracias a las reacciones termonucleares que allí acontecen.

Las condiciones en el centro del Sol son tan extremas que la materia, compuesta principalmente por átomos de hidrógeno, se combina y forma nuevos elementos más pesados en un proceso de fusión nuclear, convirtiendo un poco de la masa existente en energía, siendo la misma masa del Sol la que controla este proceso, atenuando y liberando suavemente la energía producida. El movimiento de materia de un lugar caliente a otro frío es un proceso natural que ayuda a transportar la energía hacia fuera del Sol.

Tiene un radio de 696.000 km, cien veces más grande que el radio terrestre. Su temperatura superficial es de aproximadamente 5300°C y se encuentra a 149.600.000 km de distancia de la Tierra. Salvando esta distancia, la Tierra intercepta una energía del Sol que en la parte superior de la atmósfera vale 1366 W/m<sup>2</sup>.

En un año recibimos 4000 veces más energía que la que vamos a utilizar. En concreto, y gracias a la ubicación en la que nos encontramos, recibimos aproximadamente 1500 kilowatios-hora por m<sup>2</sup> al año, pudiendo aprovechar esa energía directamente como energía solar térmica. O incluso también podemos convertirla.

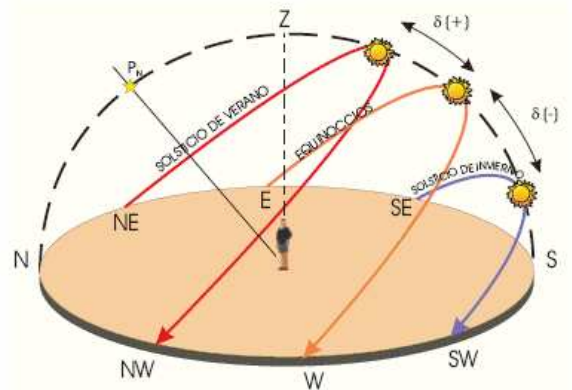
### **Movimientos Sol – Tierra**

La Tierra orbita alrededor del Sol realizando dos movimientos simultáneos, Uno de rotación, alrededor de un eje que pasa por los polos llamado eje polar, a una velocidad aproximada de una vuelta por día; y otro de traslación, alrededor del Sol describiendo una órbita elíptica en la que el Sol ocupa uno de los focos. El plano que contiene esta órbita se llama plano de la elíptica y tarda un año en recorrerlo por completo.

El movimiento de rotación es el que define el día y la noche. No obstante, la cantidad de luz y el número de horas que recibe la superficie de la Tierra depende de la inclinación del eje del planeta, que es de unos  $23,45^\circ$ . Así, pues, la inclinación de la Tierra y el período de rotación del planeta definen los tiempos de luz y de oscuridad.

### Inclinación del Sol sobre el horizonte.

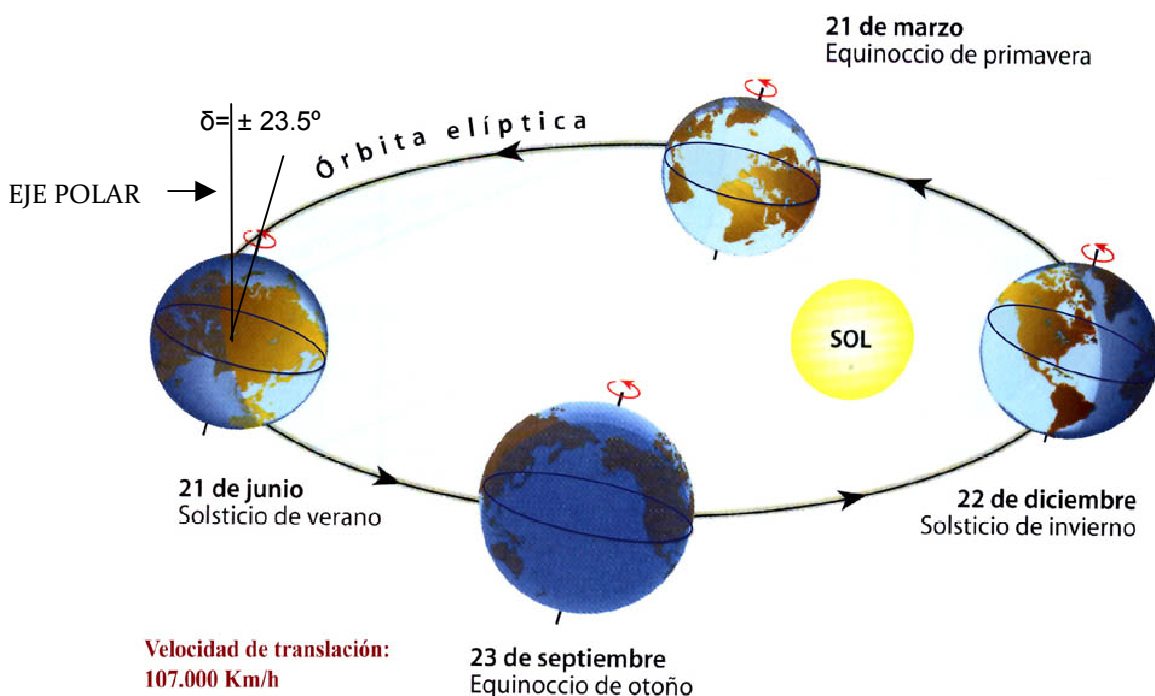
En los equinoccios y verano el arco de la trayectoria solar es más grande, el Sol se eleva más sobre el horizonte y permanece más tiempo brillando en el cielo. Por el contrario, en invierno los puntos del horizonte por donde sale y se oculta están más próximos entre sí, la trayectoria es más corta y menos elevada y el tiempo que transcurre entre el amanecer y la puesta del sol es mucho menor (duración del día solar).



### La distancia Tierra-Sol

El movimiento de traslación hace que los tiempos de exposición al Sol sean variables originando las estaciones. Esta variación en los tiempos de exposición es debido a que el eje de rotación de la Tierra permanece prácticamente siempre paralelo a sí mismo con un ángulo de  $66^\circ 33'$  respecto al plano de la Eclíptica (plano que contiene a la trayectoria de la Tierra), esta desviación se denomina oblicuidad de la Eclíptica. La pequeña excentricidad de la Eclíptica (0,01673) hace que la distancia entre el Sol y la Tierra sea distinta en Invierno y en Verano.

Para el hemisferio norte, las estaciones se sucederían de la siguiente manera:



Llamamos **declinación solar ( $\delta$ )** al ángulo formado por la línea que une los centros de la Tierra y el Sol y su proyección sobre el Ecuador.

$$\delta(^{\circ}) = 23,45 \cdot \text{sen} \left[ \left( \frac{360}{365} \right) \cdot (d_n + 284) \right]$$

siendo  $d_n=1,2,\dots,365$  el día del año, comenzando a contar a partir del 1 de enero y considerando que febrero tiene 28 días, con lo que el día 365 corresponde al 31 de diciembre.

En el Hemisferio Norte, en el Solsticio de Verano la declinación tiene su valor máximo positivo  $23^{\circ}45'$  disminuyendo hasta ser igual a  $0^{\circ}$  el 23 de septiembre (Equinoccio de Otoño). Por contra, en el Solsticio de Invierno, la declinación toma el valor su valor mínimo  $-23^{\circ}27'$  y vuelve a aumentar hasta anularse en el Equinoccio de Primavera.

La excentricidad de la Eclíptica hace que la distancia entre la Tierra y el Sol varíe durante el año. En los Equinoccios de Primavera y Otoño la distancia es de 1 UA (*U.A = Unidad Astronómica*), mientras que en el **Afelio**, que coincide con el Solsticio de Verano, la distancia es máxima: 1,017 UA, y en el de Invierno, en el **Perihelio**, es mínima: 0,983 UA.

Es decir, en el momento de los respectivos Solsticios de Verano, en el Hemisferio Norte la Tierra se encuentra en su punto de mayor alejamiento de nuestra estrella (Afelio) y cuando tiene lugar en el Hemisferio Sur la Tierra y el Sol se encuentran en su punto de máxima proximidad (Perihelio).

La oblicuidad de la eclíptica permite explicar, por un lado, el distinto calentamiento de la Tierra en función de su posición en la órbita (estaciones), y por otro, la distinta duración del día y la noche a lo largo del año.

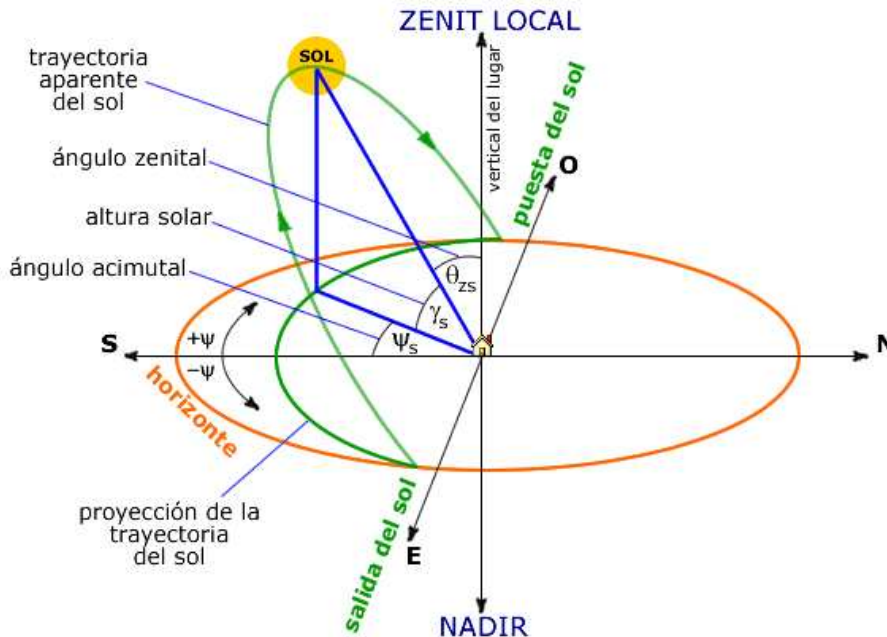
La superficie terrestre recibe los rayos con una inclinación diferente, según la época del año, y por tanto, la energía efectiva que incide en un metro cuadrado de superficie horizontal varía considerablemente. En invierno los rayos del Sol caen en un ángulo pequeño respecto a la horizontal, lo contrario que en verano, en que el ángulo es mucho mayor. Por esta razón la energía total incidente es muy superior en verano que en invierno, si se considera la energía incidente en un determinado periodo de tiempo, también es mucho mayor en las horas centrales del día que en las horas cercanas al amanecer o la puesta del sol.

## **Posición del sol**

A la hora de estudiar la inclinación más adecuada con la que se debe orientar la cocina, es necesario precisar la posición del Sol en cada instante para optimizar su rendimiento.

El sistema más apropiado para definir cada una de estas posiciones es la de coordenadas polares. En este sistema el origen está situado en la posición del receptor. El plano fundamental es el horizontal, tangente a la superficie terrestre. La perpendicular a este plano en dirección a la semiesfera celeste superior define la posición del zenit del lugar o zenit local. En la dirección opuesta, a través de la Tierra, se sitúa el nadir. Las direcciones principales sobre el plano horizontal son la Norte-Sur, intersección con el plano meridiano del lugar, y la perpendicular a ella Este-Oeste, intersección con el plano denominado primer vertical. Respecto al sistema anteriormente descrito, la posición del Sol se define mediante los siguientes parámetros:





**Latitud ( $\lambda$ ):** Es la complementaria del ángulo formado por la recta que une el zenit y el nadir con el eje polar. Es positivo hacia el Norte y negativo hacia el Sur.

**Meridiano:** Círculo máximo de la esfera terrestre que pasa por el lugar, por el zenit y por el nadir.

**Ángulo Zenital ( $\theta_{zs}$ ):** Es el ángulo formado por el radio vector punto-Tierra y la vertical del lugar. Es positivo a partir del zenit.

**Altura solar ( $\gamma_s$ ):** Ángulo que forman los rayos solares sobre la superficie horizontal. Ángulo complementario de la distancia zenital.

**Ángulo acimutal ( $\psi_s$ ):** Ángulo formado por la proyección del Sol sobre el plano del horizonte con la dirección Sur. Positivo  $0^\circ$  a  $180^\circ$  hacia el Oeste y negativo hacia el Este  $0^\circ$  a  $-180^\circ$ .

**Horizonte:** Lugar geométrico de los puntos con altura 0.

## Naturaleza de la radiación solar

La radiación solar tiene varias componentes:

- Extra-atmosférica: Fuera de la atmósfera
- Directa: Procede directamente del sol y depende de su posición.
- Difusa: Procede de la atmósfera y es la consecuencia de los procesos de reflexión, difracción, dispersión y absorción.
- Reflejada o de albedo: Procede de la reflexión de la radiación incidente sobre el entorno, reflejada por el suelo.

Radiación total incidente sobre una superficie. Global = Directa + Difusa + Reflejada:

$$I_G = I_b + I_d + I_g$$

La mayor parte de la energía del Sol nos llega en forma de luz visible y de calor. Este tipo de energía interacciona fácilmente con la materia en la Tierra, y una parte es absorbida mientras que





el resto es reflejado hacia el espacio. La insolación depende de la latitud de cada punto del planeta. Un 47 % de la radiación solar que incide en la atmósfera llega a la superficie terrestre; un 31 % directamente y un 16 % indirectamente como radiación difusa; un 19 % es absorbido por la atmósfera y las nubes; aproximadamente un 30% es reflejado y dispersado a su vez por las nubes y el resto de partículas atmosféricas; y los distintos componentes de la superficie terrestre reflejan una media del 4% de la radiación. **[Fuentes:** <sup>(1)</sup>*Perspectiva ambiental* 25 Junio 2002 – Cocinas Solares; <sup>(2)</sup><http://www.meteored.com>]

En un día claro, un 4 % es luz ultravioleta, un 46 % es la radiación visible y un 50 % son rayos infrarrojos. Cualquier cuerpo que reciba la radiación solar tiene la propiedad de absorberla y, por tanto, de elevar su propia temperatura.

Pero no todo lo que emite el Sol es beneficioso para nosotros en la Tierra. Junto con la luz y el calor que nos manda, a veces también recibimos energías dañinas como lo son los rayos X y el viento solar; las auroras boreales y australes son vistosos fenómenos atmosféricos causadas por la interacción del viento solar con nuestra atmósfera.

## ***Usos posibles y aplicaciones de la energía del Sol***

La **recogida natural de energía** solar se produce en la atmósfera, los océanos y las plantas de la Tierra. Según el uso que se le dé, podemos hablar de diversas formas de energía.

Energía solar híbrida: Combina la energía solar con otra energía. Según la energía con la que se combine tenemos diferentes aplicaciones:

- Las interacciones de la energía del Sol, los océanos y la atmósfera, producen **vientos**, utilizados durante siglos para hacer girar los molinos. Los sistemas modernos de energía eólica utilizan hélices fuertes, ligeras, resistentes a la intemperie y con diseño aerodinámico que, cuando se unen a generadores, producen electricidad para usos locales y especializados o para alimentar la red eléctrica de una región o comunidad.
- Casi el 30% de la energía solar que alcanza el borde exterior de la atmósfera se consume en el **ciclo del agua**, que produce la lluvia y la energía potencial de las corrientes de montaña y de los ríos. La energía que generan estas aguas en movimiento al pasar por las turbinas se llama energía hidroeléctrica.
- Gracias al proceso de **fotosíntesis**, la energía solar contribuye al crecimiento de la vida vegetal (biomasa) que, junto con la madera y los combustibles fósiles que desde el punto de vista geológico derivan de plantas antiguas, puede ser utilizada como combustible. Otros combustibles como el alcohol y el metano también pueden extraerse de la biomasa.
- Asimismo, los **océanos** representan un tipo natural de recogida de energía solar. Como resultado de su absorción por los océanos y por las corrientes oceánicas, se producen **gradientes de temperatura**. En algunos lugares, estas variaciones verticales alcanzan 20°C en distancias de algunos cientos de metros. Cuando hay grandes masas a distintas temperaturas, los principios termodinámicos predicen que se puede crear un ciclo generador de energía que extraiga energía de la masa con mayor temperatura y transfiera una cantidad a la masa con temperatura menor. La diferencia entre estas energías se manifiesta como energía mecánica (para mover una turbina, por ejemplo), que puede conectarse a un generador, para producir electricidad.



La **recogida directa de energía** solar requiere dispositivos artificiales llamados colectores solares, diseñados para recoger energía, a veces después de concentrar los rayos del Sol. La energía, una vez recogida, se emplea como:

Energía solar térmica: Para producir agua caliente de baja temperatura para uso sanitario y calefacción.

Los sistemas de calefacción solar incluyen equipos especiales que utilizan la energía del Sol para calentar o enfriar un gas o un líquido que luego se almacena o se distribuye.

Energía solar fotovoltaica: Para producir electricidad mediante placas de semiconductores que se alteran con la radiación solar. En los procesos fotovoltaicos, la energía solar se convierte en energía eléctrica sin ningún dispositivo mecánico intermedio.

Energía solar termoeléctrica: Para producir electricidad con un ciclo termodinámico convencional a partir de un fluido calentado a alta temperatura (aceite térmico).

Energía eólico solar: Funciona con el aire calentado por el sol, que sube por una chimenea donde están los generadores.

Otros usos de la energía solar y ejemplos más prácticos de sus aplicaciones:

- Centrales térmicas
- Esterilización de agua
- Destilación
- Evaporación
- Secado
- Control de heladas
- Acondicionamiento de aire
- Arquitectura sostenible: acondicionamiento y ahorro de energía más allá de la calefacción doméstica o aire acondicionado.
- Iluminación
- Refrigeración
- Energía para pequeños electrodomésticos
- **Hornos y cocinas solares**

Se han ensayado todos los usos citados de la energía solar, pero no se han llevado a la escala industrial. En muchos casos, el costo de la realización de estas operaciones con energía solar no pueden competir con el costo cuando se usan otras fuentes de energía por la gran inversión inicial que es necesaria para que funcionen con energía solar, y por ello la mayor parte de los problemas de utilización de esta energía están relacionados con problemas económicos.

Otros impedimentos con que se tropieza para recoger la energía solar, almacenarla y usar la energía resultante, se ven acentuados debido a que los mecanismos actuales para ello no son suficientemente eficaces.

## *La crisis de la leña.*

Cocinar es una actividad que debe llevarse a cabo casi a diario para el desarrollo de la vida. Una enorme cantidad de energía se gasta regularmente al cocinar.

Los países en desarrollo, tienen que lidiar con la falta de suministro de energía apropiada. Las soluciones empleadas en los países industrializados, generalmente no son aplicables, debido a que las diferencias en la estructura del consumo de energía son muy grandes. Las cifras mundiales indican que en 1980, 500 millones de personas tuvieron graves problemas con el suministro. Este problema concierne ahora a cerca de 2 millones de personas. Especialmente en las zonas rurales, pero también en las zonas urbanas marginales, marcadas por la falta de infraestructura, las familias, las instalaciones de la comunidad (escuelas, hospitales, etc) y los grupos de refugiados que sufren bajo la creciente escasez y el gasto de energía de las fuentes de cocina tradicional. El consumo eléctrico es aquí 150 veces más pequeño que el de los países industrializados y la electrificación rural es inferior al 5 %.

En la mayoría de los hogares rurales y muchos de los urbanos en los países subdesarrollados o en vías de desarrollo, la fuente de energía tradicional y más popular es la leña, en su mayoría para aplicaciones domésticas y prioritariamente para cocinar.

En los países en desarrollo los combustibles de la madera son una fuente de energía muy importante y vital para la estabilidad nutricional de las familias pobres en zonas rurales, son una gran fuente de energía en África, Asia y América latina, donde representan 89, 81 y 66 % del consumo total de madera, respectivamente.

En 1980, aproximadamente la mitad de la población mundial dependía de la madera para satisfacer sus necesidades energéticas. Para los habitantes de los países en desarrollo es el recurso energético básico de tres cuartos de la población. En 1987, la biomasa aportó 15 % de la energía mundial y 38 % de la energía usada en los países en desarrollo, y en alguno de estos países, en África por ejemplo, el consumo en el hogar familiar, puede alcanzar el 90% del suministro de energía total (*BMWi\**, 1995) y una vista detallada muestra que la leña se utiliza principalmente para la preparación de comida.

Hoy los países en desarrollo consumen más madera y productos derivados, fundamentalmente leña y carbón. Como fuente de energía la madera representa 80 % del total y el 20 % restante es para usos industriales.

Estos combustibles son ampliamente usados, ya que resultan más baratos que otros. Entre los consumidores están las familias, industrias, empresas comerciales e instituciones, mayormente en áreas rurales. Los patrones de consumo energético de las familias son específicos para cada sitio, varían de un país a otro y de un área a otra dentro de un país. Dependen del tipo de área (rural o urbana), disponibilidad de los recursos locales, del clima y de combustibles alternativos, y pueden variar en dependencia de la estación del año, pero el factor común es que son usados en todos los casos principalmente para cocinar. Otras aplicaciones importantes son calentar el agua y proporcionar calor.

En Asia la madera abarca 30 % del consumo total de energía. En los países sudasiáticos entre el 20 y 80 % de la demanda de energía es cubierta por la madera. El sector más consumidor es el doméstico.

En Tailandia el consumo de energía procedente de la madera suministró en 1996 hasta 49 % de toda la energía en el sector doméstico. En Bangkok la leña y el carbón son ampliamente usados para una gran gama de labores domésticas.

\* *BMWi: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie - Ministerio Federal de economía y tecnología alemana.*



Para el continente africano, en la mayoría de los países las fuentes de energía para el sector doméstico son la leña y el carbón, particularmente las áreas rurales dependen de la leña. En Malawi cerca de 60 % de la demanda de leña responde a familias rurales y principalmente para la preparación de alimentos. En Kenya en 1987 la leña figuró en las estadísticas de la energía nacional con 73 % y ha continuado satisfaciendo las necesidades energéticas de la población.

En América Latina tenemos el caso de Nicaragua, donde la leña es la mayor fuente de energía, así como el primer producto forestal. En 1998 se estimó que la leña representó 58 % de la energía consumida y 70 % de toda la madera consumida. El total de consumo es de 2 o 2,5 millones de toneladas por año, con 90 % del total para la cocina doméstica.

El consumo de madera como combustible en algunos países es más del doble del rendimiento obtenido con ella, algo que ha favorecido la degradación del medio ambiente debido a la deforestación y la escasez de leña.

### **Problemas asociados**

Los **riesgos ecológicos** asociados a la deforestación debido a la tala de árboles constante para las provisiones de leña, son obvios. La erosión y el avance del desierto son particularmente devastadores en Nigeria. En Sahel y en la región de Sudán, el consumo de leña excede la tasa de crecimiento de los bosques. Las regiones pierden alrededor del 5% de sus bosques cada año. Según Mainguet [escritor dedicado a la desertización] la distancia para el transporte de la madera es de 120 km en Bamako (Mali) y 200 km en Khartoum (Sudan). En Ougadougou (Burkina Faso), la distancia es aproximadamente 150 km.

El consumo de leña es de 1.000 millones de metros cúbicos al año, y el consumo de esta leña para cocinar produce unas emisiones en la atmósfera de unos 825 millones de toneladas de dióxido de carbono (el equivalente al 41% de las emisiones de CO<sub>2</sub> de la Unión Europea: 2.000 millones de toneladas por año)

Tanto el carbón como la leña tienen asociados durante la combustión incompleta, la emisión de gases tóxicos como monóxido de carbono, del que se sospecha es la principal causa de **enfermedades respiratorias** y conjuntivitis, entre las mujeres que cocinan a diario con estos combustibles, así como infecciones respiratorias agudas en los niños que las acompañan. Además, si no se manejan adecuadamente, pueden ser muy poco higiénicos para cocinar.

El **coste** de adquisición de leña se está convirtiendo cada vez en más prohibitivo para la mayoría de los habitantes rurales y urbanos con ingresos bajos.

El coste de combustibles fósiles alternativos basados en las cocinas, y su falta de fiabilidad de suministro de estos como el queroseno y el gas natural licuado presentan tales obstáculos, que rara vez se adoptan en los hogares. Consecuentemente una gran cantidad de horas que podría utilizar el hombre para servicios productivos, y una gran proporción de los ingresos de la familia se emplean regularmente en la adquisición de la energía para una actividad tan básica como es cocinar. Las familias gastan más de un tercio de sus ingresos mensuales para obtener leña y no hay otra alternativa.

La **seguridad** es otro factor de vital importancia; la leña es recolectada por los jefes de familia y por las mujeres que tienen a cargo esta tarea. En ocasiones, estas mujeres ponen en peligro su vida, ya que debido a la falta, cada vez más, de bosques, las distancias que han de recorrer para recoger la leña son tales que deben enfrentarse a peligros como son los animales salvajes que viven en esas zonas.

Podemos centrarnos en casos y situaciones concretas. Existe un caso muy revelador en el sur de Zambia. Allí, existe un Parque Natural que representa un gran fuente de ingresos para la región gracias al turismo. Para que esto se mantenga como tal, existe una necesidad imperiosa de proteger el medio ambiente, lo cual significa que para la gente resulta desalentadora la recogida de leña para cocinar por el interés presente de prevenir la deforestación.



Mujeres recogiendo y cargando leña en Luangwa, Zambia. **Fuente:** <http://www.youtube.com/watch?v=4tI9TLRokzs>

La gente de estas poblaciones se ve obligada a caminar enormes distancias para encontrar la madera necesaria, esto lleva implícito a su vez otros peligros. Las mujeres se tienen que desplazar cada vez más lejos de sus poblados a áreas más peligrosas, pues van acabando con las reservas de madera de los lugares cercanos. Realizan travesías de hasta tres horas a pie, debido también a que no se les permite cortar árboles sanos, únicamente está permitida la tala de árboles secos. En ocasiones, no tiene elección y cortan árboles sanos, puesto que se enfrentan también al riesgo de morir por ataques de elefantes. Una media de diez personas mueren cada año por ataque de elefante en el valle de Luangwa en Zambia. Otro factor muy importante, es la manera en la que han de cargar la leña sobre sus cabezas caminando tan largas distancias y transportando cargas muy pesadas.

## ***El uso del Sol para cocinar. La cocina solar.***

Alrededor del 50 % de los 3.200 millones de toneladas de madera recogida en todo el planeta se quema como combustible. Es decir, que un producto con tantas aplicaciones tecnológicas como la madera se acaba convirtiendo en calor. Los subsaharianos consumen sólo el 2,7 % de la energía mundial. En favor de solventar esta situación, se pueden explotar otras fuentes de calor más limpias y renovables.

La energía solar es, en contraposición a la quema de madera, no consumista y no contaminante, y lo que es más, la energía solar es abundante y por lo tanto se convierte en una fuente de energía fiable y sostenible.

Puede ayudar a solventar el problema de la inseguridad en el uso de la energía para cocinar, que es el principal requisito de la energía para el ámbito doméstico. En estas condiciones, las cocinas de energía solar, resultan cada vez más atractivas como sustitutas de las cocinas convencionales. Se han llevado a cabo varios intentos en diferentes países para introducirlas y se han logrado éxitos variables.

Las cocinas solares presentan muchas ventajas: económicas, ya que el precio del combustible para cocinar ya no es asequible para muchas familias; ecológicas, puesto que en muchas de estas regiones la deforestación está ligada al uso de madera como fuente de energía; y sociales, debido a que el dinero empleado para la compra del combustible podría ser empleado para comprar comida, medicinas y otros productos básicos de necesidad que mejoran la calidad de vida; unido a que no resultan perjudiciales para la salud.

Esta tecnología, puede ser una alternativa viable a los medios actuales de cocina, sin embargo requiere resolver diversos temas críticos para lograr que sea aceptada y difundida. Entre estos aspectos que se deben salvar se incluyen conseguir modelos adaptados a cada lugar, tamaños, capacidades, materiales y diseños óptimos, seguros y fáciles de usar, junto a un coste asequible, pues se parte de la base de que además de ayudar al medio ambiente, ayudan a familias con escasos recursos económicos.

Se han llevado a cabo estudios teóricos y prácticas experimentales para evaluar varios modelos de cocinas solares, como el que estamos desarrollando aquí para la cocina Primrose.

En el caso particular que aquí hemos comentado, en el valle de Luangwa en Zambia, también se fomenta el uso de las cocinas solares. En este caso se introdujeron en forma de premio, premio que recibió el guía del Parque Natural, quien dice que tan pronto como conoció a cerca de las cocinas solares, fue consciente de que era la solución a los problemas a los que se estaba enfrentando la gente del lugar. En la zona, una enorme cantidad de tierras están siendo deforestadas, y si en estas comunidades se introducen las cocinas solares está deforestación podrá ser reducida, así como todos los riesgos asociados a la recogida de leña. Se puede conseguir una mejora en la calidad de vida de las comunidades que más lo necesitan.

Como es natural, las cocinas solares han de hacer frente a ciertos inconvenientes que se presentan en su desarrollo y difusión.

En estas comunidades también se debe luchar frente a las antiguas supersticiones que habitan en sus formas de vida, así como la desconfianza a cerca de la posibilidad de cocinar sin electricidad ni leña.





La naturaleza intermitente de la energía solar, es la mayor **desventaja** para la adopción de cocinas solares como solución a los problemas que presentan las técnicas tradicionales. Así como la falta de apoyo gubernamental a la introducción de estos proyectos.

Sin embargo, el desarrollo y la popularidad de cocinas solares eficientes que pueden emplearse cuando es factible, podrían reducir sustancialmente los recursos energéticos dedicados para cocinar, además de producir un impacto positivo tanto en la economía de los países en vías de desarrollo como en el desarrollo ecológico del Planeta.

Las cocinas solares, presentan otros usos que no sean el de cocinar.

Pueden usarse también para hervir agua para beber, proporcionando el acceso a agua esterilizada, libre de agentes patógenos, a millones de personas y así prevenir las enfermedades transmitidas por el agua. Aunque muchas organizaciones de la salud recomiendan que para purificar el agua debe ser hervida, también es cierto, que el agua puede ser pasteurizada a temperaturas por debajo de la de ebullición, rondando los 67-70°C, dependiendo del tiempo de exposición; temperaturas fácilmente alcanzables con las cocinas solares.

Cocinas utilizables como secaderos de productos vegetales, frutas y otras sustancias agrícolas que resulta enormemente importante, ya que si los productos contienen mucha agua, esta se mantendrá en el ambiente y elevará la humedad, perjudicial también en muchos casos por ser causante de problemas de salud. Además, los productos secos, necesitan menos espacio para ser almacenados, y se mantienen más tiempo mejor conservados.

Al plantear soluciones a los problemas asociados a la necesidad de alimentación, nos centramos en estos países en vías de desarrollo, pues presentan la mayor evidencia de dichos problemas. No obstante, también resulta obvio este problema, para otro tipo de situaciones extremas, que pueden darse por ejemplo en situaciones de guerra. En estas circunstancias, la dificultad de suministro resulta patente en lugares castigados por trágicas situaciones bélicas, o en campos de refugiados, a los que no llega el suministro eléctrico. En estos casos, se puede ofrecer como solución la aportación a la población de cocinas solares.

Se estima que siendo utilizadas las cocinas solares por 2000 familias, en diez años se ahorrarían 0,1 millones de dólares de consumo de leña y 2 millones de dólares en carbón. [Fuente: *Encyclopedia of Energy*, Vol 5 2004 Elsevier]



### **3. HISTORIA Y ESTADO DEL ARTE**

#### ***Historia de la evolución de las cocinas solares***

El primer intento de cocinar con la energía solar conocido en el mundo fue conseguido por el suizo Horace-Bénédict de Saussure (1740-1799) quién en 1767 construyó su cocina solar negra, aislada con varios cobertores de vidrio. Incluso sin reflectores, consiguió cocer frutas satisfactoriamente, alcanzando una temperatura de 88°C. Con el paso de los años, de Saussure y otros se centraron en el diseño de la cocina solar realizando variaciones en la forma, tamaño, espacios, cobertores, aislamientos, reflectores, y la composición y la reflectancia de las superficies internas.

En África, el astrónomo inglés Sir John Frederick Herschel, utilizó cocinas solares en 1837, en el Cabo de Buena Esperanza, Sudáfrica. Empleó una caja de color negro, fabricada con madera dura, con una ventana de doble cristal y sin reflector. Lo enterró en la arena para favorecer el aislamiento. La temperatura alcanzada fue de 116° C, y consiguió cocinar carne y verduras.

Agustin Mouchot diseñó una cocina comunitaria para cocer pan y patatas para las tropas francesas en 1870.

En Asia, los experimentos sobre las cocinas solares se llevaron a cabo por un inglés, William Adams, en Bombay, India en 1878. Él utilizó los espejos de vidrio plano dispuestos en una forma de pirámide invertida de ocho lados que centraba la luz a través de un campana de vidrio cilíndrica hasta el lugar donde se situaban los alimentos. Él escribió el primer manual de cocinas solares titulado "Calor Solar: Un sustituto del carbón en países tropicales", escrito en 1878 en India.

En América, un estadounidense, Samuel Langel, fue pionero en la cocina solar en 1884. Él utilizó una cocina de caja, en el Monte Whitney, California, a una altitud de más de 4 km.

Después de los primeros pioneros, existen otros difusores de cocina solar y los investigadores en el siglo 20.

La primera versión comercial fue diseñada por M.K. Ghost en India en 1945.

Un intento importante de introducir cerca de 200 cocinas solares de concentración desarrolladas en la Universidad de Winsconsin, fue llevado a cabo en diferentes Estados con al ayuda de la Fundación Rockefeller. Tras ciertos problemas iniciales, la cocina fue rediseñada y la versión modificada de la cocina fue utilizada durante muchos años.

Otro de los proyectos más importantes de introducción de la cocina solar, se produjo en India en 1953 cuando se llevaron para su utilización 200.000 cocinas parabólicas de concentración.

Muchas organizaciones e instituciones en todo el mundo están investigando sobre cómo mejorar la eficiencia de las cocinas solares y que sean aceptables para los usuarios previstos. Algunas de estas organizaciones son la Agencia alemana de cooperación técnica (Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit, GTZ) y Solar Cookers International (Internacional de Cocina Solar) y otros en Europa y América del Norte. Pese a los intentos que se han realizado para difundir las cocinas solares en África, sólo se han logrado modestos resultados y se ha prestado muy poca atención al contexto social definido por las necesidades de los usuarios potenciales.

El estudio más exhaustivo de la cocina solar señalado en África es el realizado en Sudáfrica. Se trataba de pruebas de campo de cocinas solares y su difusión (GTZ, 1999). Durante un año se desarrollaron ensayos de campo comparativo de siete tipos diferentes de cocinas solares, con la



participación 66 familias en tres áreas de estudio en Sudáfrica, se llevó a cabo por el Departamento sudafricano de Minerales y Energía (DME) y la GTZ. Los diferentes tipos de cocinas: cuatro cocinas de caja, una de concentración y dos de colector. Todos los siete tipos de cocinas demostraron ser capaces de manejar los platos tradicionales. Un programa piloto de difusión comercial de las cocinas concluye que a menos que los aspectos técnicos se ajusten a las necesidades de la gente, la tecnología de cocción solar nunca será capaz de ganar cualquier popularidad real.

En el vecino país de Lesotho se obtuvieron diferentes resultados en otro estudio. Aquí puesto que ya usaban el fuego para calentar sus hogares, prefirieron cocinar en sus fuegos en lugar de utilizar las cocinas solares. la percepción de los usuarios fue negativo.

Solar Cookers International ha tenido recientemente un gran avance en Kenya en el uso de una cocina solar de panel. Más de 5 000 familias utilizan la cocina solar allí.

Se ha hecho también en Tanzania, donde varios proyectos se han aplicado sobre las cocinas solares. La labor actual se inició en 1999 y está siendo llevada a cabo en la Facultad de Ingeniería y Tecnología, Universidad de Dar es Salaam, Tanzania. Se están promoviendo en Tanzania varios tipos de cocinas solares y los que fueron desarrollados como parte de este proyecto, están siendo investigados para su mejora. El trabajo se ha basado en la realización de una prueba experimental de los resultados de cocinas solares y mejora de su rendimiento, por tanto, se busca la difusión con éxito como una tecnología alternativa para cocinar.

## ***Estado del arte***

La cocina solar es especialmente apropiada en las áreas secas y soleadas. Los países tropicales tienen un gran potencial en el uso de cocinas solares, ya que más sufren por la escasez de energía para cocinar, y la energía solar es abundante en esos países. Numerosos factores como el acceso a los materiales, la disponibilidad de combustibles de cocina tradicional, el clima, las preferencias de alimentos, los factores culturales y las capacidades técnicas, afectan a la percepción de la gente en cuanto a la cocina solar.

### CLASIFICACIÓN DE LAS COCINAS SOLARES

Estos factores a su vez implican la necesidad de una diversidad de diseños en función de dichos factores comentados. La característica común a cada diseño es la superficie transparente que permite el paso de la radiación, o en su defecto una superficie brillante de reflexión que dirige los rayos del sol en la zona de cocción, junto con la presencia de paredes interiores de la zona de cocción oscuras, igual que las del recipiente cocción. Cada tipo de cocina solar tiene ventajas cuando se compara en su capacidad de cocción: rapidez, temperatura máxima y rendimiento; facilidad de construcción y de uso o seguridad. A pesar de existir gran variedad de modelos, podemos clasificarlos en cuatro grandes grupos:

## Cocinas de panel

### **Descripción física**

Las cocinas de panel son las más sencillas, baratas y fáciles de utilizar. La cocina se basa en una superficie de cartón o similar, recubierta de paneles reflectantes que centran la luz del Sol, gracias a su diseño, en un recipiente de cocina situado en el punto que recibe más radiación reflejada por ella.

### **Ventajas**

La principal ventaja de estos modelos es su sencillez, los materiales son baratos y son muy fáciles de construir por uno mismo siguiendo unos planos simples y es por tanto muy manejable. Otra característica favorable a estas cocinas, es que no se ven muy afectadas por la presencia de nubosidad moderada. Y la necesidad de orientación no es muy importante, la atención requerida es por ello reducida.

### **Inconvenientes**

Como desventajas podemos considerar que la cocina de panel resulta muy inestable a vientos moderados, el uso de materiales caseros y baratos implica que la vida útil de la misma es reducida y las temperaturas alcanzadas no son muy elevadas.



High Back



Simple Panel



Panel for Tropics



Bubble Panel



Bubble Panel type 2



Dars Diamond Cooker

Variation in panel cookers

*Cocinas de panel en varios modelos*

**Fuente:** [http://solarcooking.wikia.com/wiki/Panel\\_cookers](http://solarcooking.wikia.com/wiki/Panel_cookers)

## Hornos solares o cocinas de caja

### **Descripción física**

Una cocina solar de este tipo, es una caja hecha con un material aislante, siendo una de las caras de uno o varios cristales, u otro material transparente, a modo de cubierta. Este tipo de cocina depende del "efecto invernadero" que provoca dicha cubierta. Se permite el paso de la radiación solar de menor longitud de onda a través de cristales transparentes, pero que es opaco a la mayoría de la radiación proveniente de mayor longitud de onda. Para incrementar el aislamiento, se utilizan paredes dobles y así mantener el calor dentro de la olla.

En el caso de los hornos, a pesar de ser muy semejantes, se utilizan espejos para reflejar la radiación solar adicional que penetra en la cámara de cocción. Por ello los materiales empleados en ellos son más sofisticados y caros.



*Hornos solares con espejos reflectantes*  
**Fuente:** <http://solarcooking.wikia.com>

### **Ventajas**

Las cocinas de caja y **hornos solares** son sencillos y baratos de construir. Los puede ensamblar el propio usuario o comprar ya fabricados. Son capaces de mantener la comida caliente durante un tiempo elevado, gracias a su fuerte aislamiento. Además, dada su composición y diseño, no deslumbran, no presenta riesgos de provocar incendios, y su forma cerrada evita quemaduras y daños físicos, y le aporta estabilidad.

En lugares donde la radiación solar difusa es elevada, y de forma característica en las cocinas de caja, se evita el problema del seguimiento y la orientación con el Sol, ya que son capaces de funcionar con una nubosidad relativamente elevada. Por ello, son muy sencillas de utilizar, y requieren una asistencia mínima en el proceso de cocinado.

### **Inconvenientes**

Las desventajas que presenta este modelo, radican esencialmente en la velocidad de cocción lenta y la falta de homogeneidad en el cocinado de los alimentos. Se considera un tiempo de cocción de entre dos y tres horas. Esta velocidad no obstante, depende del diseño y de la eficiencia térmica de la cocina u horno en cuestión.

Otro inconveniente importante, viene motivado por la forma de aislamiento, la cual provoca condensación en el interior. Esta condensación afecta a la transferencia de la radiación y provoca a su vez corrosión en las paredes internas de absorción.

Para solventar estos inconvenientes, el diseño del horno solar se está mejorando para acortar el tiempo de cocción, reducir costes, mejorar la obtención de energía y reducir las pérdidas de calor, que la cámara de cocción se mantenga y se inhiba la corrosión de las paredes internas de absorción mejorando la transmisión de la radiación solar.

## **Cocinas de concentración o reflectantes**

### **Descripción física**

La cocina de concentración solar o cocina de reflector utiliza los principios de concentración óptica. Se concentra la radiación solar directa en el fondo de la olla. La forma más comúnmente utilizada es la de una parábola, por tanto, generalmente estas cocinas se conocen con el nombre de cocinas parabólicas.



Dentro de la categoría de concentradores parabólicos, los hay de diversas clases: poco profundos, profundos, asimétricos, plegables, cilindro-parabólicos. Sin embargo también existen con otras geometrías, cilíndricas, esféricas, con espejo, o las que utilizan como reflectores lentes de Fresnel\*.

Son cocinas de concentración directa, utilizando un material reflectante, se dirige la radiación solar al punto focal de la cocina, y es ahí donde se sitúa el recipiente de cocina. Los concentradores presentan gran variedad de formas pero todos ellos requieren luz directa del Sol. Si como material se emplean espejos o lentes, pueden alcanzarse temperaturas extremadamente altas.

### Ventajas

La ventaja principal de estas cocinas es por tanto la temperatura que alcanzan. Podemos por ello cocinar cualquier tipo de alimento en poco tiempo.

### Inconvenientes

Entre los puntos más negativos de la cocina parabólica, destaca el coste elevado dado que estas cocinas son principalmente útiles para comunidades con escasos recursos económicos. Podemos sumarle el riesgo de incendio, o riesgos físicos como deslumbramiento o quemaduras a la persona que cocina. Dado su gran tamaño resulta difícil de manejar y ajustar, y es una cocina que necesita una constante orientación con la trayectoria del Sol. Se ven afectadas por la presencia de radiación difusa que interfiere mucho en la capacidad de incrementar la temperatura, por eso la potencia decae en cuanto aparece un obstáculo entre la cocina y el Sol. La capacidad de recuperación, depende del tiempo que permanece la cocina a la sombra, o bien del viento, del tamaño de la cocina, etcétera. Es a su vez, susceptible a vientos superiores a 10 km/h.



**[Referencias:** *Mullick SC, Khalifa - New solar cooker of parabolic square dish: Design and simulation, Renewable Energy, Volume 1]*



**[Fuente:** [http://solarcooking.wikia.com/wiki/Category:Parabolic\\_solar\\_cooker\\_designs](http://solarcooking.wikia.com/wiki/Category:Parabolic_solar_cooker_designs)]

*\*[Fresnel: físico francés que desarrolló una geometría de espejos formando anillos concéntricos]*

## Cocinas solares indirectas o de colectores

### Descripción física

Se compone de dos partes: los colectores solares que se encarga de la recogida de radiación solar y transferencia de calor y una parte de cocina. El usuario no se ve afectado por la radiación y el calor, debido a que la parte de cocina está separada y protegida de la radiación.

En las cocinas solares indirectas la olla está aislada de la recepción de la radiación y se basa en transferencia de calor para transmitir a la olla de cocción. El vapor es producido por los colectores planos o concentradores, y transferido a una cámara que contiene la olla. Las cocinas sin embargo, rara vez alcanzan temperaturas superiores a  $100^{\circ}\text{C}$  y el problema que existe es la condensación en el interior del colector de vidrio.

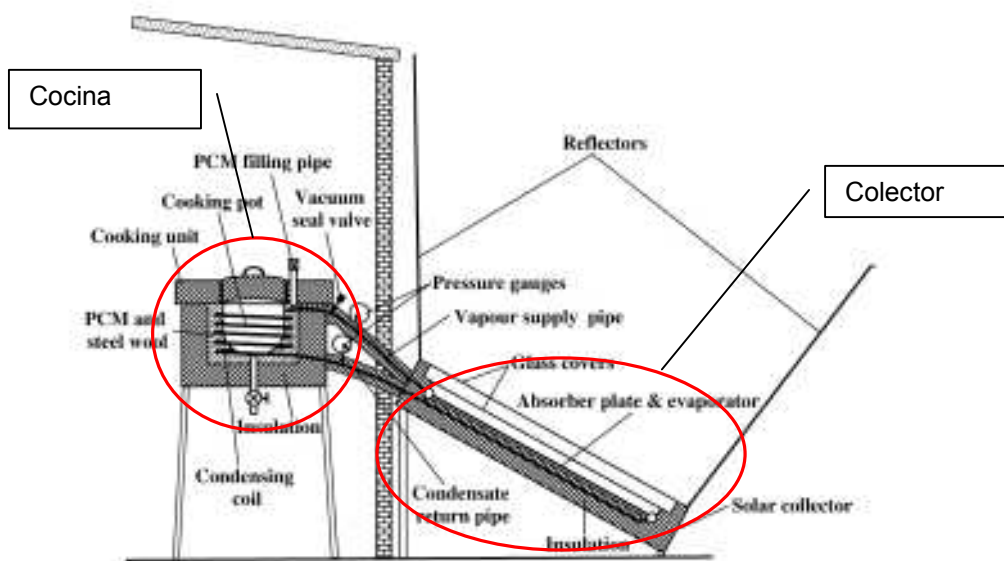


Figura esquemática de un modelo de cocina indirecta con colector solar

[Fuente: *Experimental investigation of novel indirect solar cooker with indoor PCM thermal storage and cooking unit* – Elsevier.com]

Otra posibilidad consiste en el uso de un colector solar de vacío. Este diseño de cocina indirecta pueden alcanzar temperaturas superiores a los  $200^{\circ}\text{C}$  con radiación solar directa, aunque dada la capacidad del colector, puede emplearse con presencia de nubosidad.



[Fuente: [http://solarcooking.wikia.com/wiki/Evacuated\\_Tube\\_Indirect\\_Solar\\_Cooker](http://solarcooking.wikia.com/wiki/Evacuated_Tube_Indirect_Solar_Cooker)]

**Ventajas** Rápidos tiempos de cocción, capacidades para cocinar gran cantidad de alimentos, así como posibilidad de regular la temperatura de cocción. Mantienen buen rendimiento con radiación tanto directa como difusa. Se puede destacar la ausencia de riesgos provocados por la exposición a la radiación, puesto que la cocina puede instalarse en el interior de los edificios.

### Inconvenientes

Dada su complejidad y el uso de otros elementos como son los colectores, resulta evidente pensar que el mayor inconveniente es el precio. Su instalación y volumen, a la vez de imprimirle seguridad a la cocina, supone que resulte complicada, difícil de manejar o modificar y consecuentemente de limpiar; y lo que es mayor inconveniente aún, que no esté al alcance de usuarios potencialmente interesados.

## Comparación

Las cocinas solares del mercado son muy diferentes en tamaño, modelo, rendimiento y utilidad, y no es fácil disponer de comparativas claras. De hecho, para analizar una cocina frente a otras, es necesario conocer el contexto en el que el usuario la va a utilizar.

	<b>Mercado</b>	<b>Coste</b>	<b>Tiempo de vida</b>
<b>De panel</b>	Hogares compuestos por familias pequeñas	En Kenya, son fabricadas por "Solar Cookers International" por 5\$US cada una. (Fuente: wikia)	La vida es corta dada la simplicidad y bajo precio de los materiales.
<b>De caja y hornos</b>	El mercado objetivo para los hornos y cocinas de caja son los hogares, generalmente compuestas de entre 2-8 personas.	Puede costar entre 0\$ y 150\$ dependiendo del tipo y calidad del material utilizado.	La vida útil de la cocina solar de caja, depende también del tipo y calidad del material utilizado. Las cocinas caseras, utilizando material reciclado, obviamente, no duran tanto como las cocinas hechas de materiales más caros.
<b>De concentración</b>	Las cocinas solares parabólicas son convenientes para hogares e instituciones pequeñas y normalmente se puede cocinar para 6-20 personas	Son generalmente más caros que los hornos debido a que se utilizan materiales costosos. Una estimación del precio sería de entre 20\$-300\$.	Tienen una larga vida útil, ya que se utilizan generalmente materiales como el aluminio, acero y acero inoxidable, que son resistentes.
<b>Indirectas</b>	Van dirigidas principalmente a pequeñas y medianas instituciones, sino también a los hogares ricos.	En general, cocinas indirectas son más caras debido al coste de los materiales utilizados, así como el aumento de requisitos de los componentes. Una estimación del costo sería de entre 250\$ - 500\$.	La expectativa de vida es larga debido también a la calidad de los materiales así como a las posibilidades de utilización en interiores.

Ref: UNEP Collaborating Centre on Energy and Environment - Final Report 1 July 2001  
"Assessment of the commercialisation of selected sustainable energy technologies, products and services: solar cookers." **Palmer Development Consulting**



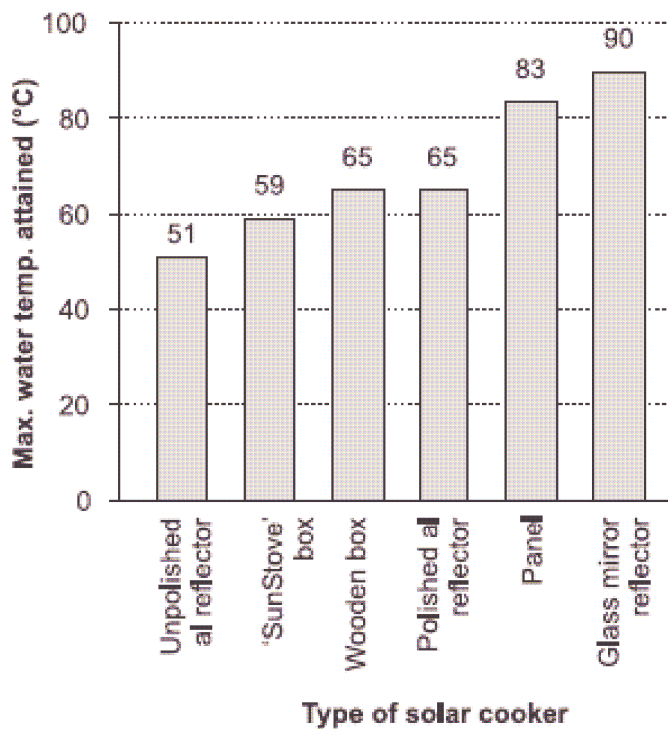
Se han desarrollado diversos estudios para, independientemente del contexto en el que van a ser utilizadas, poder comparar su rendimiento y capacidad.

Los resultados muestran como bajo condiciones meteorológicas similares, unas cocinas alcanzan mejores resultados que otras.

Las cocinas de reflector son las que mejores resultados dan.

Entre ellas podemos diferenciar entre cocinas con reflector de espejo, que son las que alcanza mayores temperaturas en un menor tiempo en días de cielo despejado. Por su parte las cocinas con aluminio pulido como reflector, tienen peor rendimiento que las de espejo. Y si consideramos las de reflector de aluminio sin pulir, encontramos el peor de los rendimientos en este grupo de cocinas de concentración.

Los hornos solares y las cocinas de caja puede utilizarse para cocinar cuando la radiación y los efectos meteorológicos no son los mejores. No obstante son modelos que no alcanzan temperaturas tan elevadas como las mejores de concentración.



*Comparativa de los distintos modelos de cocinas solares*  
[Ref: Journal of Energy in Southern Africa • Vol 18 No 3 • August 2007]

## La cocina Primrose

La **COCINA PRIMROSE** o también conocida como **Nelpa**, es una combinación basada en las cocinas de panel (de ahí el nombre de "Nelpa", que es una especie de una forma invertida de "panel") y de concentración. Se consigue cambiando las posiciones del panel y la cocina, y en lugar de estar el panel sobre la olla, ahora todo el conjunto se da la vuelta para que el panel esté en la zona inferior; considerándose una asociación con las cocinas de concentración por ser el panel inferior un espejo reflectante.

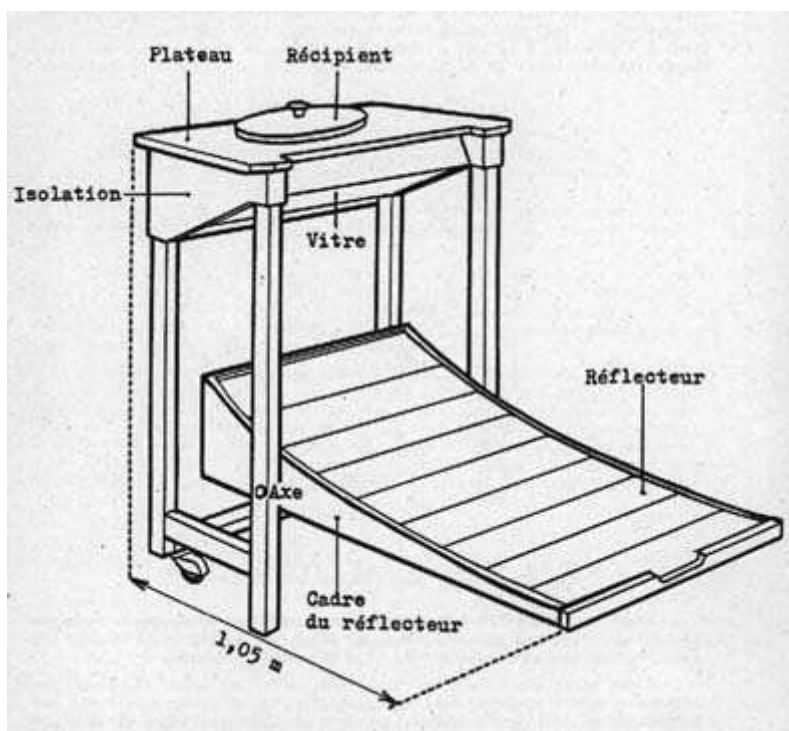


Ilustración esquemática de una cocina Primrose.

La Primrose fue inventada por Roger Bernard, y mejorada por Bernie Mueller a partir de la combinación arriba especificada. Se construye como una cocina en la cual destaca la ventaja de poder permanecer a la sombra mientras se cocina y controlar la comida mientras tanto.

### Ventajas

- La olla se encuentra al exterior, no encerrada, por tanto resulta accesible la hora de manipular, probar...
- Dada esta configuración, el vapor no condensa en el interior de las superficies de vidrio o plástico.
- La tapa de plástico que favorece el efecto invernadero, tiene una posición permanente lo que impide daños y facilita el mantenimiento
- La incidencia de los rayos del Sol es por los laterales y la zona inferior, que están en contacto con el alimento. En el caso de otros modelos de cocina, la incidencia es por la zona de la tapa en la cual no hay alimento.

El panel superior de la cocina, se utiliza además como mesa para preparar los alimentos, o poner los utensilios de cocina como cucharas y demás cubiertos. Además la configuración nos da la opción de que a la vez que el panel reflectante capta la radiación solar, la persona encargada de la cocina puede permanecer a la sombra pues se sitúa por detrás de la olla.

La necesidad de ser ajustada y el momento preciso se perciben a simple vista, y se consigue fácilmente moviendo el panel hasta que un reflejo de la olla se ve a ambos lados de las asas de la misma o en su base, consiguiendo alinear dicho reflejo en el centro de la base.

Después de cocinar, la cocina puede plegarse recogiendo el panel reflectante.

### Desventajas

- Parte del calor se pierde por la tapa que no tiene aislamiento, al igual que el vapor.
- El diseño es más complicado, y requiere una orientación constante para seguir el recorrido del Sol a lo largo del día.
- El precio es más elevado por sus facilidades y comodidades de utilización, así como el empleo de materiales más caros.



Cocina solar, modelo Primrose

Fuente: <http://solarcooking.wikia.com/wiki/Primrose>

## Situación actual de las cocinas solares

Los resultados obtenidos indican que muchas de las cocinas se podría utilizar para cocinar los alimentos para los hogares en zonas de media y alta insolación, con una selección adecuada del tipo y especificación de las cocinas.

Presenta por tanto un mercado potencial de cocinas solares enorme. Sin embargo, las deficiencias y limitaciones técnicas, la influencia negativa de un clima variable, la economía, cultura, uso personal y social de las mismas, han impedido que esta tecnología se convierta en una alternativa realista a las cocinas de leña. Pero a pesar de los factores en contra, se siguen realizando estudios, mejoras y pruebas para impulsar su difusión.

En la Plataforma Solar de Almería, el Comité Europeo para la Investigación de la Cocina Solar, ECSCR (European Committee for Solar Cooking Research) prueba 25 cocinas diferentes, incluyendo cocinas de caja, concentradores y cocinas de colector de placas planas. Los diferentes modelos se han desarrollado en Francia, Alemania, Ghana, India, Sudáfrica, España, Suiza y los

EE.UU.. Las pruebas analizan las propiedades de cocción de los equipos durante períodos de insolación alta y baja, su facilidad de uso y de manejo.

El progreso alcanzado desde el punto de vista técnico es también el resultado de la creación de la ECSCR. Desde 1991, numerosos investigadores de cocinas solares en todo el mundo se han conectado, regularmente han intercambiado experiencias y puesto sus diferentes modelos para las pruebas de conjuntos. Se pone especial interés en el desarrollo de cocinas apropiadas para instituciones como escuelas, centros de salud y los campos de refugiados.

La experiencia de los últimos años ha demostrado que la difusión a gran escala de cocinas solares sólo puede tener éxito si los usuarios están dispuestos a cambiar sus hábitos de cocinar. Las cocinas solares chocan con dificultades de aceptación, por ejemplo, porque la cocción al aire libre es en muchas culturas es extraño, o que las cocinas a la dan a los platos tradicionales de un sabor diferente. Muchas cocinas están diseñadas exclusivamente para utilizar una olla, que es con frecuencia insuficiente.

Los cocinas ya operan en líneas viables económicamente, incluso en la actualidad. Aunque la inversión inicial es relativamente alta, las cocinas tienen una vida útil de hasta diez años, pero la rentabilidad a largo plazo, no resuelve el problema de que las personas que necesitan la mayoría de las cocinas solares no pueden pagarlos. También se considera que los cálculos económicos deben incorporar los beneficios macroeconómicos de la cocina solar, y por esto, las cocinas deben ser subvencionadas por resultar beneficiosas para el medio ambiente y por razones de salud, de la misma manera que lo son otras formas de energía renovables.

*[Fuente: Second International Solar Cooker Test" of the ECSCR - Household Energy Programme of the Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ)]*

### **Formas de cocinar**

Existen diferentes maneras de cocinar los alimentos. Las principales son: hervir, freír, asar y cocer u hornear.

- Si queremos hervir, es por todos conocido que necesitamos temperaturas que rondan los 100°C para que los alimentos estén cocinados. En este caso, una vez que se ha alcanzado el punto de ebullición, no se requiere mucho más calor excepto lo necesario para mantener en equilibrio las pérdidas y ganancias.
- Si vamos a freír, deberemos tener en cuenta las propiedades del aceite a utilizar, pero en general se necesitan entre 200 y 300°C. Por ello para freír necesitamos mucha potencia, que obtendremos con cocinas de concentración.
- En el caso de asar, el calor se transfiere principalmente por radiación y en menor medida por convección, y al igual que al freír, necesitamos la potencia elevada que consiguen las cocinas de concentración.
- Para cocer, el calor se transfiere a través de las paredes por convección y radiación. Un modelo apropiado para este método de cocción, es el horno solar.

## ***Características que influyen en el funcionamiento de la cocina solar***

Existen ciertos efectos que afectan directamente al funcionamiento y el rendimiento de las cocinas solares. Estos factores de influencia, son expuestos de forma breve a continuación.

La **absorción de radiación** por la atmósfera. A medida que la radiación solar pasa a través de la atmósfera, parte es absorbida y parte dispersada por sustancias como el ozono, oxígeno, agua y polvo. Cuando los rayos solares atraviesan la atmósfera perpendicularmente, el flujo solar se reduce alrededor del 15 al 30%, dependiendo del periodo del año.

El flujo solar llega como radiación directa y difusa, ésta que viene desde todos los ángulos puede suponer alrededor del 5 al 15% del flujo solar en un día claro. En un día que está muy nublado y el sol no se ve, toda la luz que se ve es difusa. Las cocinas solares se diseñan y operan en su mayoría con radiación directa, sin embargo algunos modelos pueden operar cuando también está presente la radiación difusa. De forma orientativa, se sabe que las cocinas reflectantes comparativamente, ofrecen mejor rendimiento en áreas con cielo despejado (mayor radiación directa), mientras las cocinas de panel, o cocinas de colectores lo hacen en condiciones de nubosidad moderada, y los hornos ante condiciones de elevada nubosidad. Esto conlleva implícita la consideración de que la especificación de cada cocina debe basarse en las medidas de radiación de la ubicación considerando ambas componentes directa y difusa.

La **hora** del día. La tierra da vueltas, haciendo que la posición relativa del sol varíe desde el amanecer hasta el atardecer. El tiempo solar se mide desde el mediodía solar, cuando el sol está directamente en el sur (norte) en el hemisferio norte(hemisferio sur).

Los resultados experimentales para determinar el mejor tiempo de cocción revelan que la mañana y al atardecer cuando el ángulo del sol son bajos, tienen una intensidad baja de radiación solar y, por tanto, no son aptos para la cocina solar. Entre aproximadamente 9.00 am a 4.00 pm, la intensidad solar es alta, oscilando entre 700 y 1000 W/m<sup>2</sup>, lo que representa una franja horaria adecuada para la cocina solar. [Ref: *Journal of Energy in Southern Africa* • Vol 18 No 3 • August 2007]

La **latitud** es otro factor influyente. Esto es así porque según el ángulo de latitud en el que nos encontremos, la dirección que siguen los rayos solares será distinta. Así en regiones comprendidas en la zona intertropical, el Sol puede incidir perpendicularmente en el medio día, mientras que al norte o al sur de estas latitudes ( $\pm 23,5^\circ$ ) el Sol puede no incidir perpendicularmente en algunos momentos del año, o en ninguno según la posición.

La **fecha** del año, dada la rotación de la Tierra y su inclinación con respecto al plano de revolución, afecta directamente a la intensidad con que incide la radiación solar sobre la Tierra. El solsticio de verano es el día cuando el Sol del mediodía tiene mayor altitud, y es el día con más tiempo de luz solar.

Según la **altitud** del lugar. A mayores altitudes, más delgada es la capa de la atmósfera que tienen que atravesar los rayos solares. Por tanto menor porcentaje del flujo solar será absorbido en ella y dispersada antes de llegar a suelo terrestre, así el flujo será mayor.

Para los primeros kilómetros de altura sobre el nivel del mar, aumenta el flujo solar de 190 W/m<sup>2</sup> por cada kilómetro [Ref: *Aden Meinel, astrónomo*].

**Condiciones meteorológicas.** Los aspectos anteriores, son calculables y conocidos, sin embargo hay que tener muy en cuenta que las condiciones atmosféricas son enormemente influyentes en las condiciones de operación de las cocinas, el viento, las nubes, la lluvia impiden el proceso de cocinado.



En relación a la importancia de las condiciones meteorológicas, hay autores como Funk\* que consideran que no son aceptables experimentos realizados con cocinas mientras la radiación incidente sea menor de 450 W/m<sup>2</sup> o superior a las 1100, así como se plantea también que la velocidad del viento no debe ser superior a 2,5 m/s durante más de diez minutos.

\* **[Referencia:** Funk Paul., *Evaluating the international Standard procedure for testing solar cookers and reporting performance*, Solar Energy]

**[Fuente:** *Technology of Solar Cooking* – EdPejack]





## **4. OBJETIVOS**

---

El objetivo de este proyecto se centra en el estudio global de un modelo de cocina solar.

Ya han sido descritos los principales problemas que plantea la necesidad de comer y por tanto cocinar alimentos para simplemente vivir. Estos problemas pueden ser solventados en cierto modo con el uso de estas nuevas cocinas. En este proyecto, a parte de presentar el problema, conocido por todos, se pretende dar un nuevo estudio para ayudar a su erradicación.

Se han presentado diferentes modelos de cocinas solares, así como ciertas comparaciones entre ellas, centrándose ahora en el estudio de uno de estos modelos ya existentes.

Partiendo de una revisión teórica, unas prácticas experimentales y concluyendo con un trabajo de desarrollo para la evaluación de la cocina solar Primrose. Se exponen los conocimientos teóricos, unidos al proceso de experimentación llevado a cabo con la cocina a estudio en la Universidad Carlos III de Madrid.

En este proceso, se recogen una serie de datos, recogidos en una campaña de experimentación llevada a cabo en los meses de verano del año 2009, teniendo en consideración diferentes condiciones de ensayo. Estas condiciones y los resultados obtenidos, nos darán unas evidencias para poder analizar y evaluar la capacidad de la cocina solar a estudio. Con las distintas condiciones de trabajo, se pretende concluir, qué factores favorecen y cuáles perjudican el comportamiento y el rendimiento de la ya mencionada cocina.

Una vez obtenidos los resultados y las conclusiones empíricas, se plantea la opción de intentar ofrecer mejora en el uso de la misma, así como plantear nuevos usos o mejoras para trabajos futuros.



## 5. MEDICIONES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

### *Descripción y características de la cocina*

La cocina Primrose se basa en un espejo cóncavo introducido en un soporte de madera, con el cual se puede orientar el espejo hacia el Sol, cambiando su inclinación a medida que cambia la posición del Sol por el movimiento de rotación de la Tierra. Este espejo se sitúa entre las patas de una mesa de madera y bajo ella. En esta estructura de madera se aloja la olla para cocinar, quedando sólo una parte de la misma expuesta al ambiente.

La posibilidad que permite el soporte de orientar el espejo, provoca que la incidencia de los rayos solares, sean reflejados en la base de la olla de la que se dispone para cocinar. Los rayos que no inciden directamente en la base de la olla, lo harán en unos espejos que se encuentran en la parte inferior de la mesa en la que se encuentra dicha olla, pequeños espejos orientados a 45° que facilitan y permiten el aprovechamiento de todos los rayos del Sol que inciden en el espejo, enfocándolos en la base de la olla.

Todo este proceso a su vez, se ve mejorado por el efecto invernadero que se provoca gracias a una estructura acristalada (de plástico transparente, metacrilato o similar) que cubre tanto la base de la olla como los espejos orientados bajo la mesa. Esta estructura permite que entren los rayos pero que no salgan y por ello en su interior el incremento de temperatura se ve favorecido.



Imagen 1 Cocina Primrose. Ejemplar utilizado para este estudio.

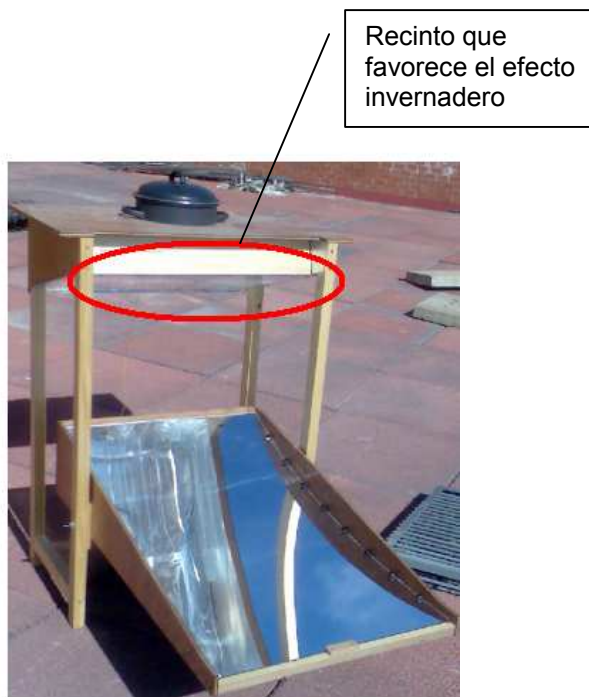


Imagen 2 Detalle de la cocina

En las cocinas de concentración, la energía térmica que llega al recipiente de cocina, se ve rápidamente afectada por la presencia de nubosidad o cualquier obstáculo entre el Sol y la cocina. La duración en el tiempo de la nube y otros factores tales como el viento, o el tamaño del recipiente, determinarán el tiempo invertido en la recuperación de la temperatura y las condiciones previas.

## 6.1 *Estudio experimental*

---

La tarea de caracterización de una cocina solar, no es una tarea fácil debido a las diferentes exigencias de cada uno de los distintos modelos de cocina. Cada cocina físicamente tiene unos requerimientos de utilización diferente, y por tanto también son distintos los datos, cálculos, parámetros y consideraciones a tener en cuenta.

En el caso que nos atañe de la cocina solar Primrose, a la hora de afrontar el estudio y caracterización de la misma se toman ciertas estimaciones que veremos a continuación, debido a la particular forma de la misma, y a las condiciones atmosféricas que no pueden valorarse de una manera exacta.

Para la caracterización de la cocina, se llevan a cabo una serie de experimentos en exteriores, entre los meses de junio y septiembre de 2009, desarrollados en la misma cocina, basados en el seguimiento de las normas establecidas en el ámbito mundial para el estudio de la capacidad y las posibilidades de la cocina solar. Nótese desde un principio, que aún partiendo de la base de que influyen enormemente las condiciones atmosféricas de cada día, de antemano no se van a considerar para el análisis los datos del día 20 de Julio, en el segundo de los ensayos desarrollados este día, pues no se cumplen los requisitos mínimos necesarios para alcanzar resultados apropiados. La radiación, factor principal, era menor de  $450 \text{ W/m}^2$ . No obstante se presentan los resultados para plantear y comprobar la importancia de registros atmosféricos favorables, y el efecto negativo de los desfavorables.

Los procedimientos establecidos para la caracterización de cocinas solares, se desarrollan basados en las normas estándar. Los tres estándares más representativos para llevar a cabo estos estudios, son utilizados en diferentes partes del mundo. Éstas tres son la norma Americana, ASAE (American Society of Agricultural Engineers Standard), del año 2003; la norma India, Bureau of Indian Standards Testing Method; y la norma Europea, European Committee on Solar Cooking Research Testing Standard.

La norma Americana, muestra el incremento de la temperatura del agua dentro de la olla, mientras la cocina opera en unas características concretas, dadas en el estándar, para llevar a cabo el proceso, concluyendo con un valor normalizado de su potencia.

Normas\Norma americana.doc (Anexo2)

La norma India, se basa en un proceso térmico de cálculo del tiempo que se tarda en alcanzar la temperatura de referencia. Temperatura obtenida de forma experimental, y descrita a través del desarrollo de una curva característica.

Normas\Norma india.doc (Anexo3)

En la norma Europea, por su parte, se evalúa el proceso siguiendo distintas condiciones experimentales, que han sido estipuladas en el estándar, sobre los detalles de medida.

Normas\Norma europea.doc (Anexo4)

A la hora de llevar a cabo las mediciones físicas realizadas, es necesario contar con la instrumentación adecuada para la toma de valores de los cambios de temperatura, para lo cual se ha hecho uso de un termopar que era introducido en el fluido para así registrar los valores de cambio de la temperatura. Con ellos se consigue una base de datos necesaria para el posterior proceso y análisis de resultados.

De igual modo, resultan imprescindibles los datos proporcionados por una estación meteorológica, o medidor de parámetros como son: la velocidad del viento, la radiación solar global sobre el plano horizontal, la radiación solar global incidente sobre un plano inclinado a  $40^\circ$ , la temperatura y humedad ambientes. Con ellos se realizan los cálculos apropiados para llegar a describir las características y funciones proporcionadas por la cocina estudiada.

- Piranómetro, para medir la radiación incidente
- Anemómetro, para medir la velocidad del viento
- Termómetro, para medir la temperatura ambiente
- Humedímetro, para medir la humedad relativa del ambiente

## 6.2 Estudio teórico

---

El proceso de funcionamiento puede resumirse diciendo que, el principio de la cocina solar se basa en el aprovechamiento de la energía de los rayos solares que son orientados hacia un recipiente, se convierten en calor y de esta forma se puede cocinar gracias únicamente a la energía que recibimos del Sol.

### 1. Hipótesis de trabajo

Para empezar a trabajar en el estudio de la cocina, se tienen en cuenta ciertas hipótesis iniciales:

- 1.1. CAPACIDAD CALORÍFICA: Se considera que el comportamiento térmico del alimento en relación a su poder calorífico, es muy similar al del agua, y por tanto se toma para los ensayos los valores de masa y calor específico del agua. A su vez la olla de trabajo también tiene una masa y calor específico. Sin embargo generalmente el valor de  $mc_p$  de los materiales de la olla es mucho menor que el de la sustancia que contiene.

$$(mc_p)_{agua} = 6279 \left[ \frac{J}{K} \right] \gg (mc_p)_{olla} = 791 \left[ \frac{J}{K} \right]$$

siendo:  $m_{agua} = 1,5 \text{ kg}$ ;  $C_{p_{agua}} = 4186 \text{ J/kgK}$ ;  $m_{olla} = 1,75 \text{ kg}$ ;  $C_{p_{hierro}} = 452 \text{ J/kgK}$ .

(Fuente  $C_{p_{hierro}}$ : *Transferencia de calor*, Alan J. Chapman)

- 1.2. RADIACIÓN SOLAR: Centrándose en el modelo presentado, la presencia del espejo implica la necesidad de considerar únicamente la radiación directa. Esto es porque sólo la componente directa de la radiación es normalmente recogida por las cocinas de concentración, que luego se refleja al punto focal. No obstante, en el proceso de medición, las componentes difusa y directa de la radiación, no se pueden distinguir debido a la falta de disponibilidad de instrumentos de medida apropiados. La estación meteorológica dispone de un piranómetro para la medida de radiación global y se necesitaría un pirheliómetro para recoger exclusivamente la radiación directa, por ello se toman como hechos algunas consideraciones.

- El área de incidencia es un espejo cóncavo, se considera la superficie del mismo como un rectángulo de dimensiones las del soporte de madera que lo aloja, ya que la radiación incidente en el área de apertura es independiente de su forma.
- Para la distinción entre la radiación directa y difusa, se hace uso de una aplicación de la Comisión Europea la cual proporciona, mediante un Sistema de Información Fotovoltaica Geográfica, los valores independientes de radiación global y difusa. Con ellos, puede estimarse la radiación directa con un sencillo cálculo, asumiendo que la radiación global se corresponde con la suma de las radiaciones directa y difusa, despreciando la componente de albedo. Se tomará como una estimación, puesto que la aplicación de la Comisión Europea proporciona para cada mes los valores obtenidos a partir de la media diaria de los datos registrados ese mes.

$$I_{Global(PVGIS)} = I_{directa(PVGIS)} + I_{difusa(PVGIS)} \quad (Ec.1)$$

Con los valores de radiación global que proporcionan los datos recogidos en la Universidad, puede obtenerse una estimación de la radiación directa en la Universidad.

$$I_{directa(UC3M)} = \frac{I_{directa(PVGIS)}}{I_{Global(PVGIS)}} \cdot I_{Global(UC3M)} \quad (Ec.2)$$

- 1.3. **EFICIENCIA ÓPTICA:** Al trabajar con superficies transmisoras de la radiación, tiene que tenerse en consideración esta capacidad de transmisión de las superficies, así como la absorptancia de la olla. Se tiene por lo tanto en cuenta que el espejo tiene una transmisividad ( $\tau$ ) de aproximadamente 0,8, igual a la reflectividad de la cavidad ( $\beta$ ) recubierta internamente por una lámina de aluminio. La transmisividad de la superficie de la cubierta (de una variedad plástico transparente o metacrilato) que atraviesan los rayos solares antes de alcanzar la base de la olla puede ser de 0,9. La olla por su parte es de superficie negra mate, por dentro y por fuera, con lo cual su valor de absorptancia ( $\alpha$ ) también se encuentra en torno a 0,9.

Por eso en conjunto, siendo  $\eta_0 = \tau\beta\alpha$  se considera una eficiencia óptica de 0,52, valor orientativo.

#### 1.4. COEFICIENTE DE CONCENTRACIÓN

La capacidad que tiene la cocina solar de concentrar la luz del Sol, viene directamente relacionada con la proyección del área del captador, perpendicularmente a la radiación incidente.

La función básica del concentrador es recoger la radiación en ese área y concentrarla en otro área más pequeña, la del recipiente de cocina en este caso, para elevar su temperatura. A éste respecto se define el coeficiente de concentración geométrico como la relación entre la superficie total de captación (o área de apertura) y la superficie de recepción de la radiación. Este coeficiente C será igual a 1 mientras dichas áreas sean la misma.

En el caso de que esto no sea así, como es el caso de la cocina Primrose, en que las áreas no coinciden, este coeficiente será el cociente entre dichas áreas:  $C = A_c/A_t$ ; donde se denomina  $A_c$  al área total de captación de la energía solar, que es el área del espejo; y  $A_t$  o área de transmisión, al área de recepción del calor, considerándose éste área como la superficie inferior de la olla, que recibe el calor directamente a través de la radiación incidente, y de la reflejada en el interior de la superficie acristalada.

**Coeficiente de concentración:**

$$C_1 = \frac{A_c}{A_t} = \frac{A_{captación}}{A_{olla}} \quad (Ec.3)$$

$$C_2 = \frac{A_c}{A_t} = \frac{A_{captación}}{A_{olla+tapa\_recinto}} \quad (Ec.4)$$

Se considera la superficie de captación como un rectángulo de dimensiones las del soporte de madera que aloja al espejo.



Altura del espejo:  $h_{\text{espejo}} = 887 \text{ mm}$

Ancho del espejo:  $a_{\text{espejo}} = 525 \text{ mm}$

Área total de captación:  **$A_c = 0,4657 \text{ m}^2$**

Para calcular el área de transmisión del calor, se tendrán en cuenta dos opciones:

En un primer lugar se plantea la opción de considerar el área de transmisión de dos maneras posibles:

- Opción 1: Considerar que únicamente recibe calor la superficie de la olla que está en el interior del recinto aislado. Esto se corresponde con la superficie lateral de la olla que permanece dentro del recinto ubicado en la mesa, más la base inferior de la olla.
- Opción 2: Considerar como apertura óptica, la superficie de cristal del recinto que la cubre por debajo.

Las medidas a tener en cuenta son:

Diámetro de la olla:  $D = 185 \text{ mm}$

Altura de la olla:  $h_{\text{olla}} = 122 \text{ mm}$

Altura de la olla expuesta en el interior del recinto:  $h_{\text{interior}} = 72 \text{ mm}$

Altura de la olla expuesta al exterior:  $h_{\text{exterior}} = 50 \text{ mm}$

- El recinto es un trapecio, y tiene como medidas:

Anchura del recinto:  $a_r = 610 \text{ mm}$

Altura trasera del recinto (por la parte de madera):  $h_t = 195 \text{ mm}$

Altura trasera del recinto (por la parte del cristal):  $h_{ti} = 180 \text{ mm}$

Altura delantera del recinto (por la parte del plástico):  $h_d = 65 \text{ mm}$

Profundidad del recinto (por el lado recto):  $p = 380 \text{ mm}$

Profundidad del recinto por el lado del triángulo:

$$p_t = \sqrt{a_r^2 + (h_{ti} - h_d)^2} = 397,02 \text{ mm}$$

Los cálculos a realizar son:

Superficie lateral de la olla =  $\pi \cdot D \cdot h_{\text{interior}}$

Superficie de la base de la olla =  $\pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2$

Superficie de la tapa del recinto:  $p_t \cdot a_r$

Superficie lateral de la olla = $0,0418 \text{ m}^2$	Área total de la olla expuesta al exterior: <b><math>A1 = 0,0687 \text{ m}^2</math></b>
Superficie de la base de la olla = $0,0269 \text{ m}^2$	
Superficie de la tapa del recinto = $0,242 \text{ m}^2$	Área total de la tapa del recinto: <b><math>A2 = 0,242 \text{ m}^2</math></b>

Tabla 1

Una vez obtenidos estos resultados pueden darse los valores del coeficiente de concentración geométrica para cada una de las áreas de transmisión consideradas:



De las ecuaciones 1 y 2:

$$\text{Opción 1: } C_1 = \frac{A_c}{A_{t1}} = \frac{A_{\text{captación}}}{A_{\text{olla}}} \longrightarrow \boxed{C_1 = 6,775}$$

$$\text{Opción 2: } C_2 = \frac{A_c}{A_{t2}} = \frac{A_{\text{captación}}}{A_{\text{olla+ tapa\_recinto}}} \longrightarrow \boxed{C_2 = 1,923}$$

La configuración de la cocina, hace que la radiación solar que incide en el espejo sea reflejada hacia la olla atravesando el recinto acristalado. El área final en la que incide dicha radiación es una línea recta de pequeño espesor en la base de la olla. Sin embargo, dada la imposibilidad de calcular el espesor de ese reflejo, se considerará como área a la que se transmite la radiación, toda la superficie inferior de la olla. Esta superficie es a su vez la que transmite el calor al agua o fluido que contenga.

Teniendo en cuenta la finalidad de poner la cocina al Sol, se considera, que aunque la radiación incidente sea también transferida al recinto acristalado, el área de transmisión final es la de la olla. Se llega a la conclusión pues de que la superficie que transmitirá el calor al agua es la superficie de la olla que se encuentra encerrada en el recinto acristalado, y por ello vamos a considerar como coeficiente de captación el calculado como  $C_1$ .

Resulta conveniente comentar la influencia de la orientación del espejo con respecto a la trayectoria del Sol para que la concentración de la luz solar sea eficiente. Ésta influencia se comentará más adelante en función de los diferentes modelos de cocinas. No obstante, se considera a partir de este momento la importancia de orientar el espejo según la recepción solar. Esta orientación se tuvo en cuenta y fue controlada cada diez minutos, lo cual no aseguraba un ajuste perfecto pero se considera suficiente.

Teniendo esto en consideración, y con el fin de comparar diferentes condiciones de funcionamiento y según las pautas que establecen las normas consideradas, se procede al cálculo y análisis de los valores registrados en el proceso de experimentación.



## 2. Potencia de calentamiento

Partiendo de la expresión del **balance de energía**:

$$\dot{Q}_S - \dot{Q}_P = m \cdot C_p \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (\text{Ec.5})$$

siendo:  $m$  : la masa de agua ( [kg] )

$C_p$  : el calor específico del agua a presión constante ( [J/(kg K)] )

$\Delta T$  : incremento de temperatura del agua ( [K] )

$\Delta t$  : el tiempo empleado en la toma de medidas ( [s] )

Se emplea 1,5 litros de agua, equivalentes a 1,5 kg; sabiendo que el agua tiene un calor específico de 4186 J/kg·K.

En el caso en que se llevan a cabo las mediciones con aceite, se utiliza la misma cantidad de aceite, 1,5 litros, equivalente a 1,38 kg; y considerando el  $C_p$  del aceite igual a 1675 J/kg·K.

La potencia obtenida del Sol ( $\dot{Q}_S$ ), menos las pérdidas ( $\dot{Q}_P$ ), aportará la potencia neta. Esta potencia será máxima, cuando las pérdidas sean nulas, es decir, al comienzo del experimento.

$$\dot{Q}_{\text{neto}} = \dot{Q}_S - \dot{Q}_P = m \cdot C_p \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (\text{Ec.6})$$

$$\dot{Q}_{\text{máx}} = \dot{Q}_S - \underset{0}{\dot{Q}_P} \quad (\text{Ec.7})$$

Los cálculos realizados a partir de los datos experimentales son los siguientes:

- Considerando el incremento de temperatura inicial, se tiene la potencia al comienzo del experimento, que como ya se sabe será la máxima conseguida por la cocina.
- Si por otro lado se considera el incremento de temperatura total experimentado, es decir, considerar el último y el primer valor de la temperatura, se obtendrá el cálculo medio de la potencia que alcanza la cocina.

Los resultados quedan representados en la siguiente tabla:

Día de experimento		Potencia máxima alcanzada por la cocina [W]	Potencia media alcanzada por la cocina [W]
22 Junio	(Norma India)	94,185	35,755
<b>23 Junio</b>	<b>(Norma India)</b>	<b>73,255</b>	21,349
13 Julio	(Norma India)	52,325	17,321
<b>14 Julio</b>	<b>(Norma India)</b>	<b>83,72</b>	13,953
<b>20 Julio</b>	<b>(Norma India)</b>	<b>73,255</b>	27,325
20 Julio	(Norma europea)	10,465	-1,744
21 Julio	(Norma India)	20,93	27,325
<b>21 Julio</b>	<b>(Norma europea)</b>	<b>62,79</b>	29,492
28 Julio	(Norma India)	31,395	20,276
<b>28 Julio</b>	<b>(Norma europea)</b>	<b>73,255</b>	31,395
21 Septiembre	(Norma europea)*	123,28	42,378
22 Septiembre	(Norma europea)*	50,083	20,547
24 Septiembre	(Norma europea)*	96,313	14,447
28 Septiembre	(Norma India)	31,395	24,735
28 Septiembre	(Norma europea)	125,58	44,476

\* Medidas tomadas con aceite como fluido de experimentación

Tabla 2



En base a estos resultados se pueden observar claramente los días atípicos en el proceso experimental de toma de medidas.

Si se analizan los resultados más elevados, pueden ser explicados según las condiciones concretas y específicas de cada uno de esos días de medición:

- Los días 21 y 24 de Septiembre dieron resultados más elevados. Estos días el experimento se realizó con aceite y pudo comprobarse como observando el tiempo que tardaba el aceite en incrementar un grado su temperatura era considerablemente menor que el tiempo que tardaba el agua. En concreto se puede comprobar en el registro de datos, como en los primeros datos recogidos, con agua tardaba alrededor de tres minutos en subir un grado, mientras que con el aceite, en un minuto, subía más de 4°C la temperatura. Se destaca cómo las temperaturas y la potencia que alcanza la cocina al utilizar aceite en lugar de agua, son más elevadas.
- Sin embargo, el día 22 de septiembre, aún siento un día despejado, en el que se llevó a cabo el registro de temperaturas con aceite, los resultados son notablemente menores que el resto de los obtenidos con aceite como fluido de ensayo. Las condiciones eran adecuadas, la radiación elevada, no había viento, la temperatura ambiente también era buena. En este caso, no se tienen evidencias que justifiquen ese resultado.

En concreto, los días que presentan valores más altos de potencia, son en general días en los que se llevó a cabo el proceso descrito por la norma europea. Puede por tanto pensarse de antemano, que la norma europea contempla unas condiciones que favorecen el funcionamiento de la cocina. En estos días se empieza a medir a medio día, cuando la radiación y la temperatura ambientes son más elevados. Este factor favorece el calentamiento del agua, y por tanto mayores valores de potencia.

- Por este motivo, el día 28 de Septiembre, en el segundo período de medición con la norma europea, el valor de potencia alcanzado es muy superior al resto de los días de experimentación con agua. Se concluye pues, como ya se ha explicado anteriormente, que los días en los que se sigue la norma europea, la potencia alcanzada es elevada. Este día en concreto el valor es aún mayor porque el experimento empezó sin el precalentamiento del agua. Al ser la temperatura inicial menor que en otros casos, y la radiación y temperatura ambiente elevadas, en lugar de haber pérdidas al ambiente, se experimenta una ganancia que favorece que la temperatura sufra un incremento más pronunciado que el resto de los días en los que se ensayó la norma europea con agua.
- El día 22 de Junio resalta un resultado más alto que el resto de los valores obtenidos siguiendo la norma india con agua. Esto puede ser por que en este día se empezaron a tomar medidas más tarde que el resto de los días. Las mediciones comenzaron a las 12:30 pm, con lo cual la radiación y la temperatura eran mayores, y el agua incrementó su temperatura más rápidamente. El resto de los días se empezó a medir entre las 9:30 am y las 10:30 am lo que implicaba menor radiación y por ello que la temperatura tardara más en subir.

Igualmente, aparecen unos resultados anormalmente bajos, resultados que pueden explicarse por el comportamiento climático de esos días:

- El día 20 de julio, fue un día que se nubló mucho, por lo que la radiación directa fue muy baja, en el cual además experimentamos la norma europea sin tapa para analizar la influencia de la misma. En este ensayo por tanto, la temperatura subió un sólo grado y luego comenzó a bajar, por eso destaca el valor negativo de la potencia, valor que por tanto no se considerará para el análisis.
- Por otra parte, el 21 de Julio, empezó el día con los cielos parcialmente cubiertos, con lo que inicialmente la temperatura tardó mucho en incrementar su valor.

- En cambio, el 28 de Julio, se observa un valor menor que el resto, pero en este caso es debido a que los valores que tomamos en la primera mitad del día fueron siguiendo la norma india, pero sin la tapa, con lo cual se puede concluir, y se desarrollará ampliamente más adelante, que la ausencia de la tapa resulta claramente perjudicial para el proceso de calentamiento.
- El 28 de Septiembre, en la primera mitad del día, presenta un valor de potencia por debajo del resto, en este caso se debe a que sumado a que la toma de medidas empezó temprano, a las 9:20 am, el agua de la red salía a temperatura considerablemente menor que el resto de los días en los que se realizaron medidas, 22°C en lugar de 29-30°C de otros días. Factor que en lugar de provocar una ganancia, induce a considerar pérdidas al ambiente puesto que la temperatura ambiente era aún menor, 15°. Esto induce a pensar, que ésta sea la causa de que el incremento de temperatura en este día, a partir del cual calculamos la potencia, fuera comedido.

Por tanto, considerándose sólo los valores obtenidos en los días donde las condiciones ambientales y de ensayo, pueden declararse apropiadas, podría darse un valor promedio de la potencia.

Excluyendo todos los días comentados, y también el 13 de Julio, por tener un valor ligeramente bajo a pesar de no poder justificarlo por no presentar condiciones adversas.

- Considerando pues el resto de los días, la cocina alcanza una potencia de valor promedio igual a **73,25 [ W ]**
- Si por otra parte se tiene en cuenta el fluido de trabajo, y se analiza la potencia alcanzada sólo con aceite, resulta un valor distinto, que en promedio es de **89,89 [ W ]**

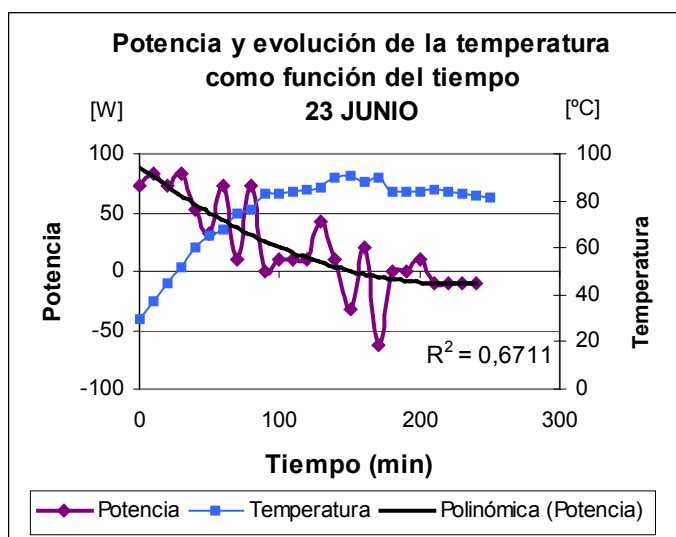


Figura 1. Representación gráfica de la evolución de la potencia y la temperatura como funciones del tiempo.

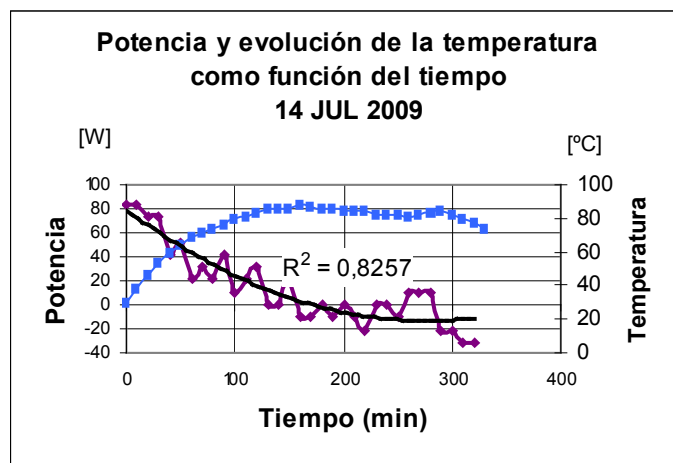


Figura 2. Representación gráfica de la evolución de la potencia y la temperatura como funciones del tiempo.

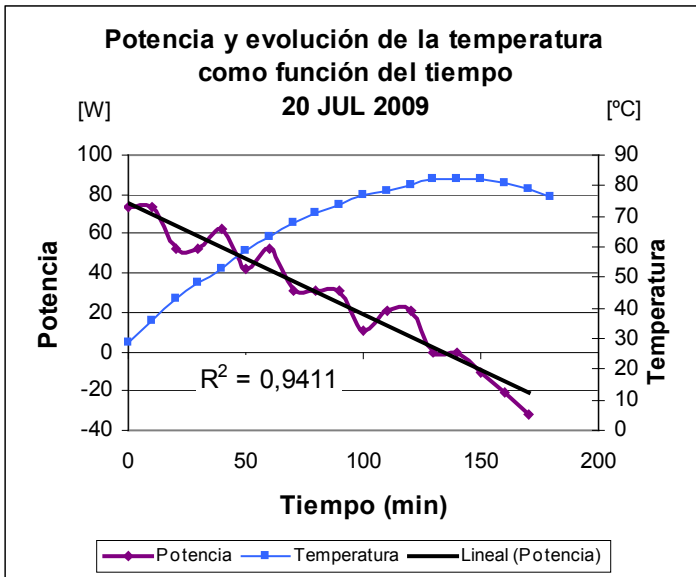


Figura 3. Representación gráfica de la evolución de la potencia y la temperatura como funciones del tiempo.

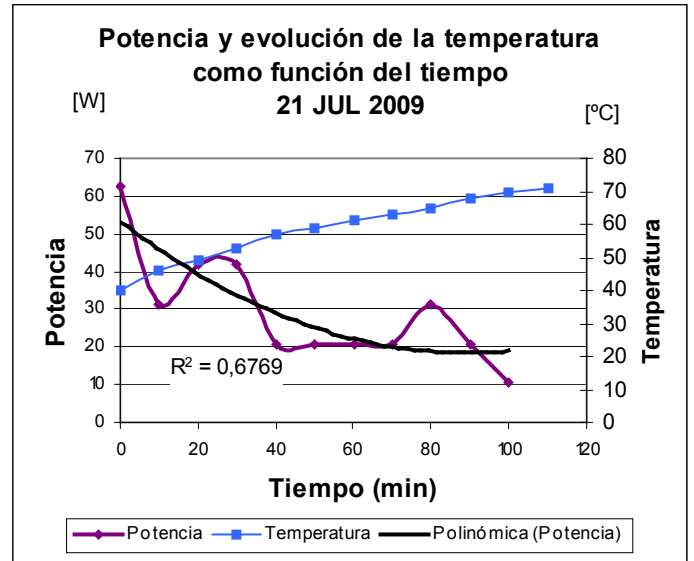


Figura 4. Representación gráfica de la evolución de la potencia y la temperatura como funciones del tiempo.

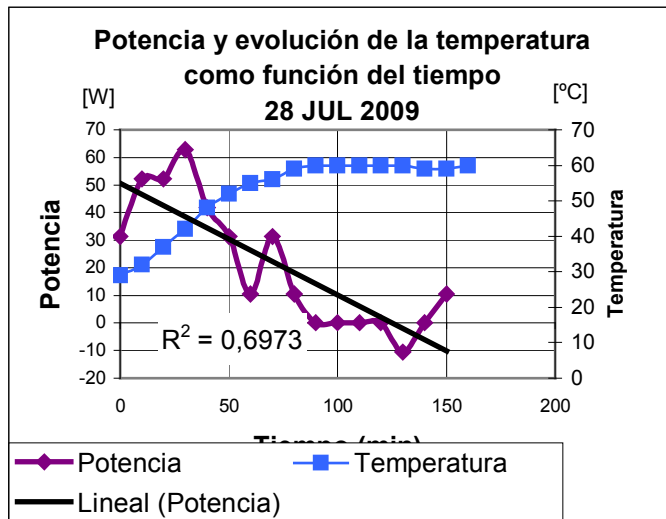


Figura 5. Representación gráfica de la evolución de la potencia y la temperatura como funciones del tiempo.

Se comprueba observando la evolución de las gráficas como en el proceso de calentamiento la temperatura se ve incrementada de manera diferente según el día y las condiciones meteorológicas presentes en el mismo.

Se puede representar también la evolución de la temperatura, en función del tiempo, en el enfriamiento.

Se observa el cambio en el comportamiento según se desarrolle bien el proceso de calentamiento o de enfriamiento.

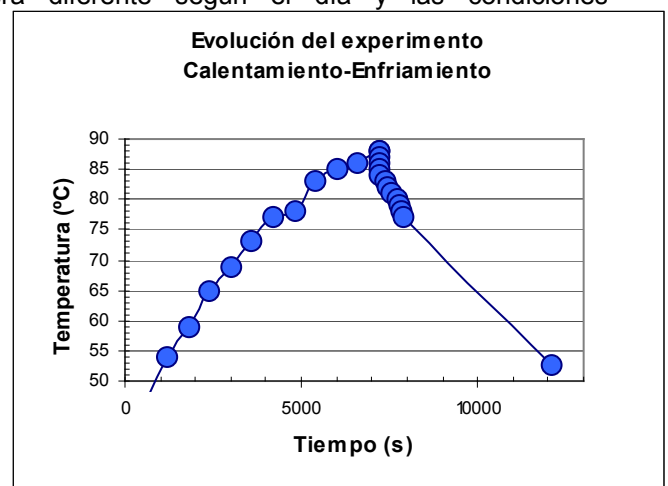


Figura 6. Representación gráfica de la evolución de la temperatura

De igual modo que puede conocerse la potencia máxima, se sabe que la potencia será mínima, cuando la energía recibida del Sol sea la misma que las pérdidas sufridas por la cocina. En este momento se habrá alcanzado la temperatura máxima conseguida por la cocina, también conocida como temperatura de estancamiento.

El estudio de la potencia, es principal objetivo de la **norma americana ASAE S580**. Este estándar fue desarrollado originalmente por el Dr. Paul Funk, en enero de 1997, como un estándar de pruebas internacionales para cocinas solares.

La figura de mérito utilizada por ASAE S580 es la potencia de cocción. En concreto la potencia normalizada, para dar un único valor intermedio y así informar al usuario de las capacidades de la cocina. Esta normalización se realiza a partir de la siguiente ecuación.

$$\dot{Q}_{normalizada} = \bar{\dot{Q}} \cdot \frac{700}{\bar{I}} \quad (\text{Ec.8})$$

Dónde:

$\bar{I}$  : es el intervalo de insolación media [ $\text{W/m}^2$ ]

$\bar{\dot{Q}}$  : es la potencia media de la cocina [W]

$\dot{Q}_{normalizada}$  : la potencia normalizada [W]

Para dar los resultados de un experimento, el autor recomienda dar un sólo valor teniendo en cuenta una diferencia de temperatura mínima de 50°C, que en nuestro caso consideraremos el incremento global de temperatura. Así la potencia normalizada obtenida será la correspondiente a la cocina (ASAE, 2003).

Día de experimento		Potencia media alcanzada por la cocina [W]	Potencia normalizada [W]	$\Delta T$ [°C]
22 Junio	(Norma India)	35,755	39,679	41
23 Junio	(Norma India)	21,349	29,412	51
13 Julio	(Norma India)	17,321	18,854	48
14 Julio	(Norma India)	13,953	15,819	44
20 Julio	(Norma India)	27,325	38,170	47
21 Julio	(Norma India)	27,325	37,074	47
21 Julio	(Norma europea)	29,492	31,455	31
28 Julio	(Norma India)	20,276	23,866	31
28 Julio	(Norma europea)	31,395	30,870	48
21 Septiembre	(Norma europea)*	42,378	43,335	77
22 Septiembre	(Norma europea)*	20,547	19,569	64
24 Septiembre	(Norma europea)*	14,447	14,605	45
28 Septiembre	(Norma India)	24,735	35,193	52
28 Septiembre	(Norma europea)	44,476	45,896	51

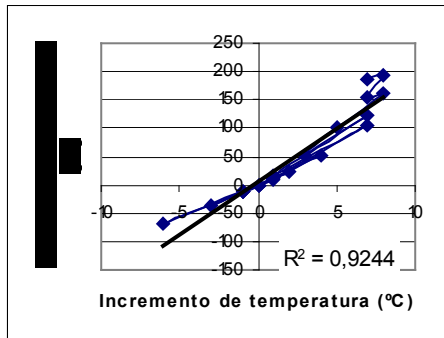
\* Medidas tomadas con aceite como fluido de experimentación

Tabla 3

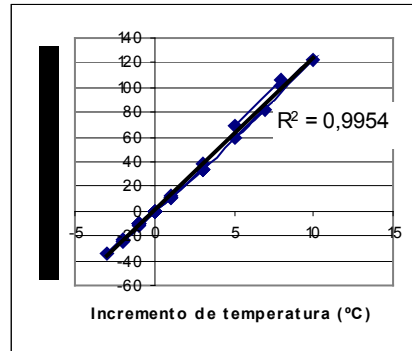
Con agua: Potencia normalizada promedio = 31,481 (W)

Con aceite: Potencia normalizada promedio = 25,837 (W)

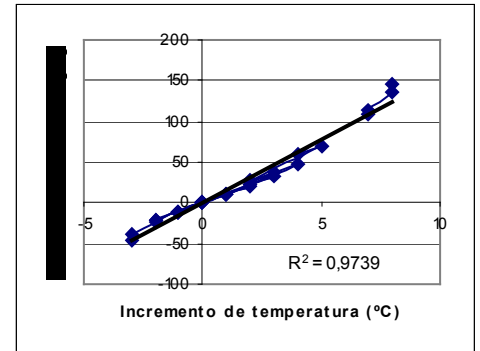
Funk también expresa el interés por representar la potencia normalizada frente al incremento de temperatura recogido en cada intervalo de medidas. Este incremento supone por tanto, los grados que cambia la temperatura entre una medida y la siguiente, incremento también a partir del cual se realiza el cálculo de potencia en cada punto. Y a partir de estos valores de potencia, se normaliza.



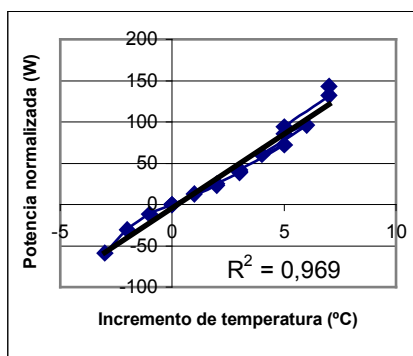
**Figura 7** Potencia normalizada en función del incremento de temperatura el 23 de Junio



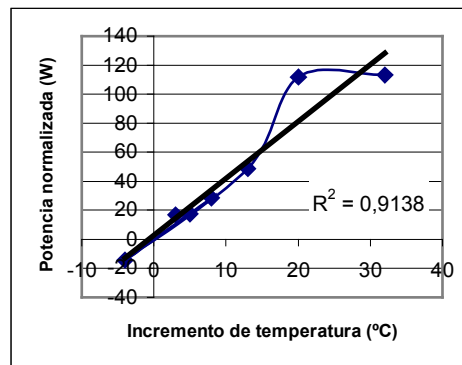
**Figura 8** Potencia normalizada en función del incremento de temperatura el 13 de Julio



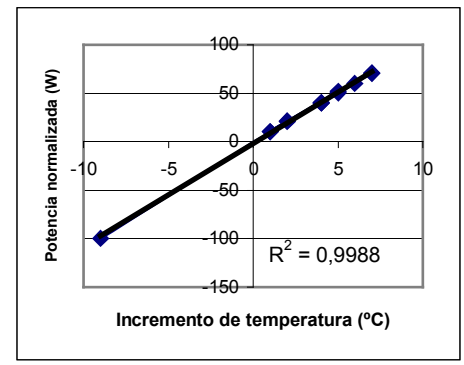
**Figura 9** Potencia normalizada en función del incremento de temperatura el 14 de Julio



**Figura 10** Potencia normalizada en función del incremento de temperatura el 20 de Julio



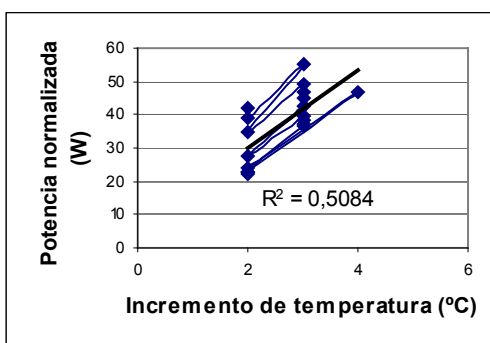
**Figura 11** Potencia normalizada en función del incremento de temperatura el 28 de Julio



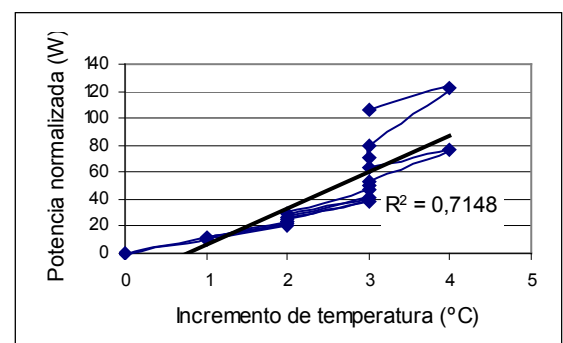
**Figura 12** Potencia normalizada en función del incremento de temperatura el 21 de Septiembre\*

El autor recomienda un ajuste por regresión lineal, que tenga un valor de  $R^2$  superior a 0,75. Esta regresión será lineal, pues representa la relación entre la potencia de calentamiento y el calentamiento en términos de incremento de temperatura. Dado que la potencia, en intervalos de tiempo constantes, dependerá únicamente de dicho incremento y de forma lineal, por ello, en términos generales la aproximación lineal se ajustará adecuadamente.

En la mayoría de los casos del estudio, esto sucede así, no obstante depende de las condiciones de estabilidad del ambiente y de la radiación incidente. Por esto, es algunos casos la aproximación lineal no resulta del todo adecuada, por la irregularidad de la tendencia de la potencia normalizada.



**Figura 13** Potencia normalizada en función del incremento de temperatura el 21 de Julio



**Figura 14** Potencia normalizada en función del incremento de temperatura el 28 de Septiembre



### 3. Temperatura de estancamiento

La potencia de calentamiento desciende por efecto de las pérdidas. Cuando la potencia sea nula, se habrá alcanzado la denominada temperatura de estancamiento.

El punto de estancamiento se obtiene de forma experimental. A partir del dato de potencia neta de la cocina, se describe una curva característica en el tiempo para las condiciones consideradas. En el punto mínimo de la curva, o lo que es lo mismo, cuando las pérdidas son las mismas que la ganancia, y por lo tanto la potencia es nula, se tiene el valor del tiempo que necesita la cocina para alcanzar la temperatura de referencia o estancamiento así como la temperatura en cuestión.

Aplicando a los datos recogidos, la expresión del cálculo de la potencia de la cocina:

$$\dot{Q}_{neta} = m \cdot C_p \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (\text{Ec.9})$$

Puede representarse la curva de los resultados.

El proceso llevado a cabo en este experimento parte de la aproximación de la curva obtenida, a otra curva de tendencia lineal o polinomial.

Estas expresiones aportarán el valor del tiempo que transcurre hasta que la cocina alcanza la temperatura de estancamiento. Se dará ese momento, cuando la curva que representa la potencia, corte al eje de tiempos. Tomando ese valor del tiempo, la temperatura alcanzada en ese momento, se corresponderá con la temperatura de estancamiento.

Se ve representado en el siguiente gráfico a modo de ejemplo:

- En primer lugar se valora la exactitud o no, de una aproximación lineal:

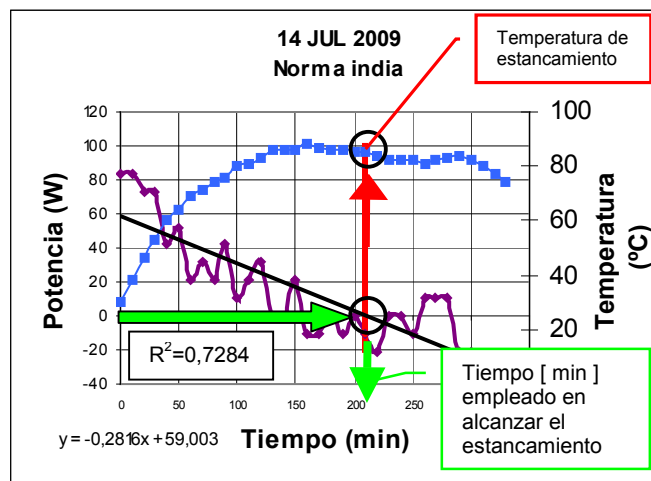


Figura 15 Obtención de la temperatura de estancamiento a partir de la aproximación de grado 1 de la curva de potencia

- Se comprueba a modo de comparación, si la aproximación polinomial de segundo orden se ajusta mejor:

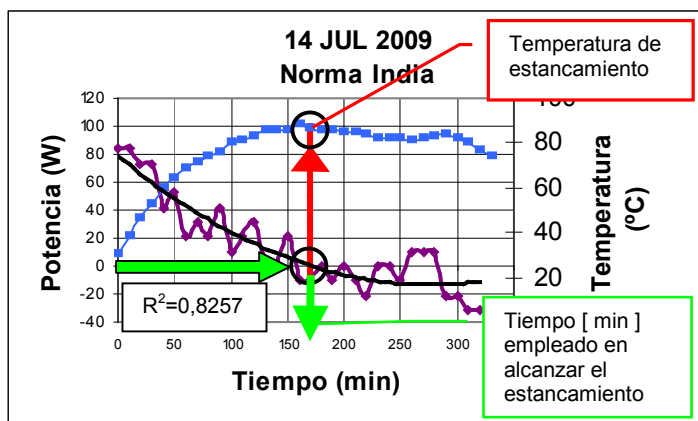


Figura 16 Obtención de la temperatura de estancamiento a partir de la aproximación de grado 2 de la curva de potencia

Entonces se valora si aumentando el orden de la curva de aproximación, los resultados se ajustan mejor o no a la curva experimental. Para ello, a parte de que a simple vista puede llegarse a una conclusión correcta, se emplea el coeficiente  $R^2$  de la línea de regresión entre los valores experimentales y los que ofrece la aproximación. Se sabe que cuánto más próximo a uno sea este valor, mejor será la aproximación utilizada. En el ejemplo arriba representado, resulta fácil comprobar como la aproximación de grado dos se ajusta más a los datos obtenidos en el experimento.

Se considera a lo sumo la aproximación de grado dos, puesto que con ella se consigue de manera suficientemente adecuada la tendencia de la curva que presentan los resultados obtenidos.

En primer lugar se analizan los resultados de la aproximación de primer grado y en los casos en los que no se ajuste adecuadamente, Se recurre a la aproximación de segundo orden. De esta manera, se pueden conseguir los siguientes valores del punto de estancamiento (tiempo y temperatura).

Día de experimento	t estancamiento (aprox. Grado1) [min]	T <sup>a</sup> estancamiento (aprox. Grado1) [°C]
22 Junio (Norma India)	119,718	76
20 Julio (Norma India)	133,022	82
20 Julio (Norma europea)	16,666	41
28 Julio (Norma India)	125,110	60
28 Julio (Norma europea)	96,970	85
21 Septiembre (Norma europea)*	55,245	112
22 Septiembre (Norma europea)*	87,4538	110
28 Septiembre (Norma europea)	115,470	71

Día de experimento	t estancamiento (aprox. Grado2) [min]	T <sup>a</sup> estancamiento (aprox. Grado2) [°C]
23 Junio (Norma India)	154,102	91
13 Julio (Norma India)	136,052	83
14 Julio (Norma India)	170,015	87
24 Septiembre (Norma Europea)*	50,285	104

\* Medidas tomadas con aceite como fluido de experimentación

Tabla 4

Ya se sabe cómo afectan las condiciones ambientales a la mayoría de los resultados buscados en el proceso de medición. En este caso, la temperatura de estancamiento de la cocina, se ve influida por el ambiente. Puede comprobarse como los días con mayores temperatura ambiente y radiación la cocina presenta mejor funcionamiento, y por tanto la temperatura alcanzada es también mayor.

A priori en condiciones ideales de Sol y temperatura ambiente, la temperatura de estancamiento debería ser la misma para cualquier fluido. Es decir, es característica de la cocina, pero como la dependencia de las condiciones es muy elevada. A pesar de ser característica de la cocina, puede verse que en los casos en los que se ensayó con aceite, esta temperatura, que ronda los 110°C, fue notablemente superior a la alcanzada con agua, de aproximadamente 86°C.

Lo que sí se confirma es que en todos los días que se utilizó el agua, mientras fueron apropiadas las condiciones atmosféricas, el valor de la temperatura de estancamiento fue siempre la misma, al igual que en todos los días que utilizamos aceite. Estos días que se consideran como buenos en cuanto a las condiciones, y que ya se vio en el caso de la potencia, fueron:

Con agua

23 de Junio -  $T_s = 91^\circ\text{C}$

14 de Julio -  $T_s = 87^\circ\text{C}$

20 de Julio -  $T_s = 82^\circ\text{C}$  (norma india)

28 de Julio -  $T_s = 85^\circ\text{C}$  (norma europea)

Con aceite

21 de Septiembre -  $T_s = 112^\circ\text{C}$

22 de Septiembre -  $T_s = 110^\circ\text{C}$

También puede concluirse de estos resultados que hay ciertos valores en días concretos que no pueden ser considerados porque no se conoce el estancamiento en el proceso experimental, como sucede en los días de toma de medidas 21 de julio y 28 de septiembre (éste último en el proceso de la norma india), que no se alcanzan resultados. Así mismo se confirma como en el caso de la potencia, que los días en los que aparecen nubes, hace viento excesivo, o la radiación no es muy alta, la cocina no responde como debiera. Por ello, los valores de temperatura en días en los que ocurrió algo de lo citado, la temperatura se veía estancada o estabilizada a 70°C, 60°C e incluso 40°C cuando la nubosidad fue muy elevada. Y este es el motivo por el cual los resultados del día 20 de Julio no deben ser considerados pues se registraron en un día con condiciones muy desfavorables. Se observa pues que los resultados son anormalmente menores al resto y por tanto descartables.

En cuanto al tiempo que se tarda en llegar a dicha temperatura, también son valores diferentes según el día y las condiciones concretas del mismo.

Así pues, el día que menos tiempo empleó en alcanzar la temperatura de estancamiento en los ensayos con agua, fue el 28 de Julio, día en que la temperatura ambiente era bastante elevada, 32°C, la radiación también, y se mantuvo prácticamente constante en el período de medición; además se trata de un caso en el que se siguió la norma europea, con lo que la temperatura del agua inicial era de 40°C lo cual aceleró el calentamiento.

El resto de los casos considerados, 23 de junio, 14 y 20 de julio, el tiempo empleado en estabilizarse la temperatura es algo más elevada. En estos días la radiación incidente era cada vez mayor, con lo cual podemos deducir que el aumento progresivo a lo largo de prácticamente todo el experimento, impedía el estancamiento.

A esta consideración se añade la circunstancia de que en los días que más tarda la estabilización, son aquellos en los que la presencia del viento es mayor. Por eso el 14 de julio, que es el día en el cual este tiempo es máximo, comprobamos como el viento estuvo presente y a velocidades elevadas, teniendo en cuenta los valores aconsejados para los experimentos que llevamos a cabo, que en el caso de la velocidad del viento, el valor recomendado es menor de 2,5 m/s.



En referencia a los valores obtenidos del tiempo de estancamiento, a pesar de las diferencias apreciables, puede decirse que son valores aceptables, puesto que se tiene conocimiento, de que la temperatura de estancamiento puede ser también estimada midiendo simplemente la temperatura de la olla 130 min después de haber empezado el calentamiento; y en el caso estudiado, la mayoría de los valores obtenidos en días con condiciones apropiadas, rondan ese valor de tiempo. (**Fuente:** *Revista científica Elsevier - Solar Energy*, "Characterisation and design methods of solar cookers" Junio 2006; [www.elsevier.com/locate/solener](http://www.elsevier.com/locate/solener).)

Las temperaturas de estancamiento mayores, coinciden con las obtenidos con aceite, al igual que los tiempos de estancamiento de la temperatura mínimos que son las recogidas esos mismos días. El hecho de que estos tiempos sean mínimos, puede ser relacionado con que el tiempo que se invierte en elevar un grado la temperatura es mucho menor con aceite que con agua.

A partir de la ecuación de aproximación aplicada a la curva de potencia, gracias a la cual conseguimos conocer y analizar el punto de estancamiento de nuestra cocina, se obtienen también los valores de potencia máximos que proporciona dicha aproximación.

Comparándose por tanto, con los obtenidos experimentalmente y seleccionando los valores de la aproximación que se ajusten mejor a la realidad:

Día de experimento		Potencia máxima alcanzada por la cocina [W]	Potencia máxima (aprox. Grado 1) [W]	Potencia máxima (aprox. Grado 2) [W]
22 Junio	(Norma India)	94,185	<b>66,144</b>	91,684
23 Junio	(Norma India)	73,255	73,71	<b>88,947</b>
13 Julio	(Norma India)	52,325	56,655	<b>91,38</b>
14 Julio	(Norma India)	83,72	59,003	<b>79,003</b>
20 Julio	(Norma India)	73,255	<b>75,703</b>	76,95
20 Julio	(Norma europea)	10,465	<b>3,4883</b>	9,7175
21 Julio	(Norma India)	20,93	27,233	21,205
21 Julio	(Norma europea)	62,79	46,617	53,203
28 Julio	(Norma India)	31,395	<b>50,632</b>	56,467
28 Julio	(Norma europea)	73,255	<b>83,145</b>	61,985
21 Septiembre	(Norma europea)*	128,32	<b>92,735</b>	127,08
22 Septiembre	(Norma europea)*	52,13	<b>55,367</b>	64,328
24 Septiembre	(Norma europea)*	100,25	58,973	<b>87,708</b>
28 Septiembre	(Norma India)	31,395	38,51	36,855
28 Septiembre	(Norma europea)	125,58	<b>84,928</b>	107,21

\* Medidas tomadas con aceite como fluido de experimentación

Tabla 5

Como ya se vio en el cálculo de potencia, si se tuviera que dar un valor de la potencia de la cocina, debería como en el resto de los casos, descartarse los casos extremos y aquellos días en los que las condiciones no fueron propicias al experimento. Puede compararse con las aproximaciones que se han ido realizando en cada uno de los días, considerando para ello la aproximación que más convenga según la curva que presenta la potencia. Por ello fijándose en la tendencia general y sabiendo los días que deben considerarse, se contemplan los siguientes valores:

Potencia máxima de la cocina obtenida empleando agua = **73,25 [ W ]**

Potencia máxima aproximada con agua [ W ]		
23 Junio	(Norma India)	<b>88,947</b>
14 Julio	(Norma India)	<b>79,003</b>
20 Julio	(Norma India)	<b>75,703</b>
28 Julio	(Norma europea)	<b>83,145</b>

Tabla 6

Potencia máxima aproximada de la cocina empleando agua = **81,7 [ W ]**

Potencia máxima de la cocina obtenida empleando aceite = **89.89 [ W ]**

Potencia máxima aproximada con aceite [ W ]		
21 Septiembre	(Norma europea)*	<b>92,735</b>
22 Septiembre	(Norma europea)*	<b>55,367</b>
24 Septiembre	(Norma europea)*	<b>87,708</b>

Tabla 7

Potencia máxima aproximada de la cocina empleando aceite = **78,603 [ W ]**

Más adelante se verá como la comparación gráfica muestra como los valores calculados se aproximan mucho a los obtenidos en la experimentación.

Para seguir describiendo las características y capacidades de la cocina, se plantea el hecho de que el rendimiento de la cocina de concentración depende esencialmente del factor de pérdidas y de la eficiencia óptica. Se continúa pues el estudio con el análisis de estos parámetros.

#### 4. Coeficiente de transferencia de calor por pérdidas

Conocer el **factor de pérdidas, o coeficiente de transferencia de calor por pérdidas**, parte del desarrollo de un intervalo infinitesimal de tiempo, para una caída infinitesimal de temperatura, expresándolo de la siguiente manera:

$$dt = \frac{(m \cdot C_p)_w \cdot dT_w}{\dot{Q}_P} \quad (\text{Ec.10})$$

$$dt = \frac{(m \cdot C_p)_w \cdot dT_w}{A_p \cdot F' \cdot U_L \cdot (T_w - T_a)} \quad (\text{Ec.11})$$

Donde:  $m$  : masa de agua ( [kg] )  
 $C_p$  : calor específico del agua a presión constante ( [J/(kg K)] )  
 $A_p$  : Área de pérdidas ( [m<sup>2</sup>] )



- $U_L$ : coeficiente de transferencia de calor por pérdidas (  $[(Wm^2)/K]$  )  
 $T_w$ : Temperatura del agua (  $[K]$  )  
 $T_a$ : Temperatura ambiente (  $[K]$  )

Al analizar las pérdidas, resulta conveniente conocer el área a través de la cual se dan pérdidas al ambiente. Considerándose para ello, la superficie de la olla que se encuentra en contacto con el ambiente exterior más el cajón de la mesa que la contiene.

- Las medidas a tener en cuenta para conocer el área de pérdidas serán:

Diámetro de la olla:  $D = 185 \text{ mm}$

Altura de la olla expuesta al exterior:  $h_{\text{exterior}} = 50 \text{ mm}$

Para la superficie de la olla expuesta al ambiente tenemos los siguientes resultados:

Superficie lateral de la olla =  $\pi \cdot D \cdot h_{\text{exterior}}$

Superficie de la base de la olla =  $\pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2$

- El recinto es un trapecio, y como se indicó anteriormente tiene como medidas:

Anchura del recinto:  $a_r = 610 \text{ mm}$

Altura trasera del recinto (por la parte de madera):  $h_t = 195 \text{ mm}$

Altura trasera del recinto (por la parte del cristal):  $h_{ti} = 180 \text{ mm}$

Altura delantera del recinto (por la parte del plástico):  $h_d = 65 \text{ mm}$

Profundidad del recinto (por el lado recto):  $p = 380 \text{ mm}$

Profundidad del recinto por el lado del triángulo:  $p_t = \sqrt{a_r^2 + (h_{ti} - h_d)^2} = 397,02 \text{ mm}$

Con estas medidas, se calcula la superficie:

Superficie plana superior de la mesa:  $p \cdot a_r$

Superficie plana de la trasera de la mesa:  $h_t \cdot a_r$

Superficie plana de un lateral de la mesa:  $S_r + S_t$

Es el área del trapecio, para calcular se divide en dos superficies, la del rectángulo más la del triángulo:

Superficie del rectángulo:  $S_r = h_d \cdot p = 0.065 \cdot 0.38 (m^2)$

Superficie del triángulo:  $S_t = (h_{ti} - h_d) \cdot \frac{p}{2} = (0.180 - 0.065) \cdot \frac{0.38}{2}$

Superficie plana superior de la mesa = $0.232 \text{ m}^2$	Superficie total de todas las tapas del recinto: <b><math>A_{\text{recinto}} = 0,686 \text{ m}^2</math></b>
Superficie plana de un lateral de la mesa = $0.0466 \text{ m}^2$	
Superficie plana del otro lateral de la mesa = $0.0466 \text{ m}^2$	
Superficie plana de la trasera de la mesa = $0.119 \text{ m}^2$	
Superficie de la tapa inferior acristalada del recinto = $0,242 \text{ m}^2$	

Tabla 8



Área total de la olla expuesta al exterior más la superficie total de todas las tapas del recinto:  
 $A_p = A_{\text{olla\_ext}} + A_{\text{recinto}} = 0,056 \text{ m}^2 + 0,686 \text{ m}^2$

$$A_p = 0,742 \text{ m}^2.$$

En este cálculo se ha añadido al área de pérdidas, todas las paredes del recinto, sin embargo esas paredes son de madera, y presenta un mejor aislamiento, con lo que las pérdidas reales en ellas serán mínimas

Por eso se considera más oportuno tomar en cuenta el área de la olla que permanece al exterior y la tapa acristalada del recinto únicamente:

Superficie lateral de la olla = 0,029 m <sup>2</sup>	Área total de la olla expuesta al exterior: <b><math>A_{\text{olla\_ext}} = 0,056 \text{ m}^2</math></b>
Superficie de la base de la olla = 0,027 m <sup>2</sup>	
Superficie de la tapa inferior acristalada del recinto = 0,242 m <sup>2</sup>	

Tabla 9

Área total de la olla expuesta al exterior más la superficie acristalada del cajón:  
 $A_p = A_{\text{olla\_ext}} + A_{\text{recinto}} = 0,056 \text{ m}^2 + 0,242 \text{ m}^2$

$$A_p = 0,298 \text{ m}^2.$$

Integrando la ecuación en el tiempo, entre los valores de temperatura registrados durante la caída:

$$t = \frac{(m \cdot C_p)_w \cdot dT_w}{A_p \cdot F' \cdot U_L} \cdot \ln \left[ \frac{(T_w - T_a)}{(T_{w0} - T_a)} \right] \quad (\text{Ec.12})$$

Tenemos,

$$(T_w - T_a) = (T_{w0} - T_a) \cdot e^{-t/t_0} \quad (\text{Ec.13})$$

Siendo:

$$t_0 = \frac{(m \cdot C_p)}{A_p \cdot F' \cdot U_L} \quad (\text{Ec.14})$$

#### ▪ **Tiempo característico de enfriamiento.**

Partiendo de la temperatura máxima que alcanza la cocina, y a partir de la cual comienza el enfriamiento, puede conocerse la **curva de enfriamiento** de cada día de ensayo.

Tomando la ecuación 13, cuando el tiempo es igual al tiempo característico de enfriamiento,  $t = t_0$ , se despeja el valor de la temperatura de enfriamiento.

$$(T_{w0} - T_a) = (T_w - T_a) \cdot e^{-t/t_0} \quad (\text{Ec.15})$$

Con este valor de la temperatura al entrar en la ecuación de enfriamiento que proporciona la aproximación exponencial de los valores recogidos en el período de medidas, se obtiene numéricamente el valor del tiempo característico de enfriamiento.

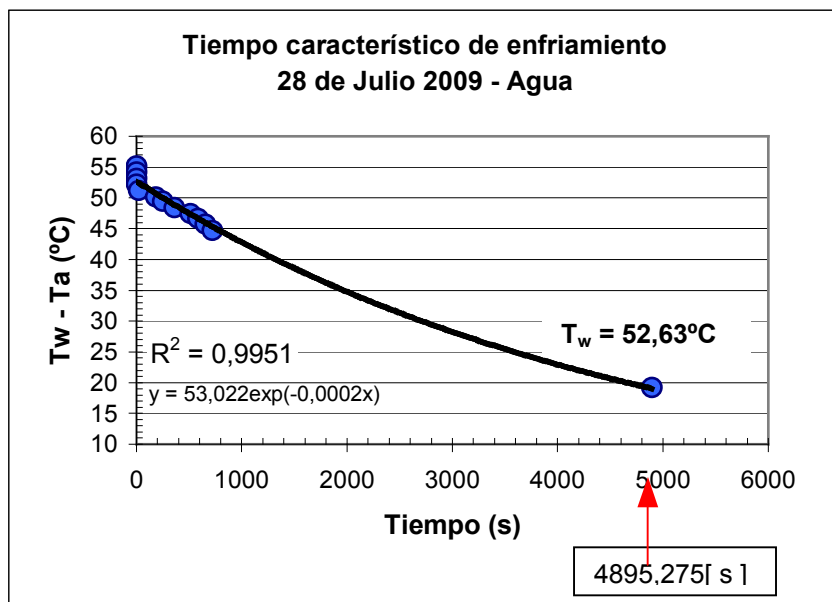


Figura 17. Representación gráfica de la evolución de la temperatura durante el proceso de enfriamiento ajustando con una exponencial los valores

de  $T_w - T_a$  registrados el día 28 de Julio.

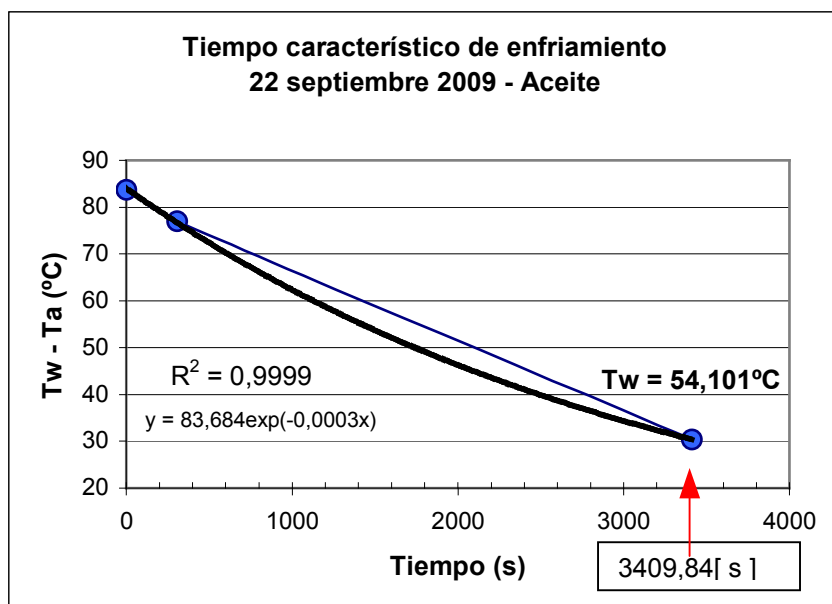


Figura 18. Representación gráfica de la evolución de la temperatura durante el proceso de enfriamiento ajustando con una exponencial los valores

de  $T_w - T_a$  registrados el día 22 de Septiembre, experimentando con aceite.

Se puede considerar a priori, que en el enfriamiento no se tomaron medidas suficientes para poder concluir que la evolución de la temperatura en el proceso ocurra tal y como aparece en la muestra.

A pesar de ello, se contempla como un desarrollo razonable por lo cual se incluye en el estudio como tal.

El resultado que obtenemos siguiendo este procedimiento, es el que sigue:

Día	Tiempo de enfriamiento [ s ]	Temperatura [ °C ]
28 Julio 2009	4895,275	52,632
22 Septiembre 2009	3409,84	54,101

Tabla 10

En un primer momento cabe pensarse, que el enfriamiento es debido a los factores ambientales. Puede suceder que se den vientos moderados, o bien que la temperatura ambiente sea baja lo cual provoque transferencia de calor por radiación hacia el exterior y consecuentemente el enfriamiento tanto en la olla, como en el interior de la misma.

Para comprobar estas primeras hipótesis o supuestos, se analizan los parámetros ambientales registrados el día del experimento, y concretamente durante el enfriamiento.

- El día 28 de julio, la temperatura ambiente es alta, de aproximadamente 32°C, y también la velocidad del viento es considerable, puesto que, como ya se ha comentado en otras ocasiones, se considera viento elevado cuando supera los 2,5 m/s durante diez minutos o más.
- El día 22 de septiembre, la temperatura ambiente es menor, ronda los 21-23°C, en este caso el viento no es un factor a tener en cuenta, pero al estar empleando aceite, el enfriamiento es más rápido pues su capacidad calorífica es menor que la del agua, por ser menor el Cp y la densidad.

Estos valores, obtenidos gráficamente, son comparados con los que permiten calcular los datos recogidos durante la experimentación.

Si durante el enfriamiento se recogen las temperaturas, puede calcularse el tiempo característico de enfriamiento  $t_0$ , para cada pareja de datos según va enfriando, y promediar un valor.

Tomando la ecuación 13, y particularizando para dos puntos con temperaturas  $T_{w1}$  y  $T_{w2}$  y sus tiempos correspondientes empleados en alcanzar dichos registros de temperatura,  $t_1$  y  $t_2$ .

$$\left. \begin{aligned} \frac{(T_{w1} - T_a)}{(T_{w0} - T_a)} &= e^{-t_1/t_0} \\ \frac{(T_{w2} - T_a)}{(T_{w0} - T_a)} &= e^{-t_2/t_0} \end{aligned} \right\} t_0 = \frac{t_2 - t_1}{\ln \left[ \frac{(T_{w1} - T_a)}{(T_{w2} - T_a)} \right]} \quad (\text{Ec.16})$$

Se llega a un resultado del tiempo característico de enfriamiento del agua de **6336,2026 [ s ]**. Y en el caso del aceite de **3687,87 [ s ]**

Estos valores se asemejan a los que obtuvimos de forma gráfica. Concretamente, el error en el caso del agua es de un 22,74% ( $\epsilon=0,2274$ ) y en los resultados del aceite la diferencia presente entre uno y otro método es de un 7,54% ( $\epsilon=0,075$ ).

Por tanto se consideran ambos resultados para determinar el resto de parámetros y concluir si estas diferencias son o no considerables.

El tiempo característico de enfriamiento depende, como bien expresa la ecuación, de las temperaturas registradas y del tiempo empleado en alcanzar dichas temperaturas, así como de la temperatura ambiente y por tanto de las condiciones ambientales; así como del área a través de la cuál se pierde calor, que es lo que provoca el enfriamiento, y de la capacidad calorífica del fluido, su  $C_p$  y densidad influyen en el comportamiento que tiene la cocina ante la pérdida de calor.

Una vez calculado el tiempo característico de enfriamiento, puede entonces obtenerse:

▪ **Factor de pérdidas. o Coeficiente de transferencia de calor por pérdidas**

$$F' \cdot U_L = \frac{(m \cdot C_p)_w}{A_p \cdot t_0} \quad (\text{Ec.17})$$

Fluido de experimentación	Factor de pérdidas con $t_0$ experimental $F' \cdot U_L$ [ W/m <sup>2</sup> K ]	Factor de pérdidas con $t_0$ gráfico $F' \cdot U_L$ [ W/m <sup>2</sup> K ]
Agua	4,304	3,325
Aceite	2,103	2,275

Tabla 11

## 5.Eficiencia óptica

La perfección de la superficie reflectante o la capacidad de absorción de la superficie exterior de la olla de cocina, pueden ser descritas gracias a la eficiencia óptica. La eficiencia óptica caracteriza una propiedad del sistema en condiciones de pérdidas térmicas nulas.

Por una parte la **eficiencia óptica** puede evaluarse a partir de la curva de calentamiento experimental. Tomamos en este caso un intervalo infinitesimal de tiempo, para un incremento infinitesimal de temperatura, expresándolo de la siguiente manera:

$$dt = \frac{(m \cdot C_p)_w \cdot dT_w}{\dot{Q}_{neta}} \quad (\text{Ec.18})$$

$$dt = \frac{(m \cdot C_p)_w \cdot dT_w}{A_c \cdot \eta_0 \cdot I_b - A_t \cdot F' \cdot U_L \cdot (T_w - T_a)} \quad (\text{Ec.19})$$

siendo:  $\eta_0$ : rendimiento óptico ( [ ] )

$I_b$ : radiación directa incidente ( [W/m<sup>2</sup>] )

$A_c$ : área de captación ( [m<sup>2</sup>] )

$U_L$ : coeficiente de transferencia de calor por pérdidas ( [(Wm<sup>2</sup>)/K] )

$A_t$ : área de transferencia ( [m<sup>2</sup>] )

Integrando la ecuación 19 en un intervalo de tiempo en el que la temperatura se ve incrementada desde un valor  $T_{w1}$  hasta otro  $T_{w2}$ ,

$$t_2 - t_1 = -t_0 \cdot \ln \left[ \frac{1 - \frac{A_t \cdot U_L \cdot F'}{A_c \cdot \eta_0 \cdot I_b} \cdot (T_{w2} - T_a)}{1 - \frac{A_t \cdot U_L \cdot F'}{A_c \cdot \eta_0 \cdot I_b} \cdot (T_{w1} - T_a)} \right] \quad (\text{Ec.20})$$

considerando según la ecuación 14, que podemos escribir:  $t_0 = \frac{(m \cdot C_p)_w}{A_t \cdot F' \cdot U_L}$

A partir de la expresión 18 se despeja y calcula el valor de la eficiencia óptica:

$$\eta_0 = \frac{m \cdot C_p}{A_c \cdot I_b \cdot t_0} \cdot \left\{ \frac{(T_{w2} - T_a) - (T_{w1} - T_a) \cdot \exp\left(-\frac{t_2 - t_1}{t_0}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{t_2 - t_1}{t_0}\right)} \right\} \quad (\text{Ec.21})$$

Día de experimento		Eficiencia óptica a partir del cálculo experimental de $t_0$ $\eta_0$ [ ]	Eficiencia óptica a partir del cálculo gráfico de $t_0$ $\eta_0$ [ ]
22 Junio	(Norma India)	0,14	0,19
<b>23 Junio</b>	<b>(Norma India)</b>	<b>0,32</b>	<b>0,42</b>
13 Julio	(Norma India)	0,16	0,20
<b>14 Julio</b>	<b>(Norma India)</b>	<b>0,23</b>	<b>0,30</b>
<b>20 Julio</b>	<b>(Norma India)</b>	<b>0,31</b>	<b>0,41</b>
20 Julio	(Norma europea)	-0,37	-0,32
21 Julio	(Norma India)	0,18	0,23
21 Julio	(Norma europea)	0,10	0,14
28 Julio	(Norma India)	0,11	0,14
28 Julio	(Norma europea)	0,14	0,18
21 Septiembre	(Norma europea)*	0,15	0,17
22 Septiembre	(Norma europea)*	0,15	0,16
24 Septiembre	(Norma europea)*	0,12	0,14
<b>28 Septiembre</b>	<b>(Norma India)</b>	<b>0,26</b>	<b>0,30</b>
28 Septiembre	(Norma europea)	0,15	0,20

\* Medidas tomadas con aceite como fluido de experimentación

Tabla 12

Los valores de eficiencia óptica dependen de la radiación y por tanto de las condiciones atmosféricas. También dependen del tiempo característico de enfriamiento. Al no tener medidas suficientes para considerar que este parámetro se obtiene a partir de la evolución muestreada, puede verse afectada la eficiencia de forma negativa. Este hecho destaca en el valor del 20 de Julio, que sabiendo ya que fue un día del cual no hemos considerado resultados, resalta el valor negativo que presenta la eficiencia óptica. No obstante, considerando los valores resultantes de los días más apropiados de ensayo, se ve que son algo menores que el valor teórico supuesto inicialmente, de 0,52, pero no distan de él de manera exagerada.

Analizando las ecuaciones empleadas, se observa que el denominador de la ecuación 19 representa la potencia neta. A partir de ésta expresión se aproxima el factor de pérdidas.

Esto es así debido a que en el momento en que la potencia neta es cero, la temperatura es constante. Este valor de temperatura se conoce como temperatura de estancamiento.

Teniendo esto en consideración y sabiendo que la potencia neta se determina como la potencia obtenida del Sol menos las pérdidas experimentadas

$$\dot{Q}_{neta} = \dot{Q}_S - \dot{Q}_P \quad (\text{Ec.22})$$

En el punto de estancamiento la potencia recibida se iguala a las pérdidas.

$$\dot{Q}_S = \dot{Q}_P \quad (\text{Ec.23})$$

$$\dot{Q}_S = \eta_o \cdot I \cdot A_c \quad (\text{Ec.24})$$

$$\dot{Q}_P = A_P \cdot U_{Ls} \cdot F' \cdot (T_s - T_a) \quad (\text{Ec.25})$$

De la ecuación 17, para el estado de estancamiento,

$$\frac{dT_w}{dt} = 0 \Rightarrow A_c \cdot \eta_o \cdot I_b = A_P \cdot U_{Ls} \cdot F' \cdot (T_s - T_a) \quad (\text{Ec.26})$$

donde  $T_s$  es la temperatura de estancamiento.

Por tanto despejando, el factor de pérdidas a la temperatura de estancamiento es conocido:

$$A_P \cdot (U_L \cdot F')_s = \frac{\eta_o \cdot I_b \cdot A_c}{T_s - T_a} \quad (\text{Ec.27})$$

Este resultado, será útil para poder avanzar en cálculos posteriores. No obstante, también deberá comprobarse si la aproximación resulta o no aceptable.

Para ello, se considera también el valor por unidad de superficie  $U_{Ls}$ . Como ya se ha hecho en puntos previos, considerándose el área de transmisión como la superficie de la olla que recibe el calor transmitido desde el exterior.

Día de experimento		$(F'U_L)_s \cdot A_P$ [ W/K ]	$(F'U_L)_s$ [ W/m <sup>2</sup> K ]
22 Junio	(N I)	3,757	12,608
23 Junio	(N I)	2,281	7,654
13 Julio	(N I)	3,292	11,046
14 Julio	(N I)	2,770	9,292
20 Julio	(N I)	2,815	9,445
20 Julio	(N E)	3,549	11,908
21 Julio	(N I)	3,670	12,317
21 Julio	(N E)	4,291	14,399
28 Julio	(N I)	5,342	17,927
28 Julio	(N E)	3,225	10,822
21 Septiembre	(N E)*	1,999	6,709
22 Septiembre	(N E)*	1,999	6,709
24 Septiembre	(N E)*	2,436	8,174
28 Septiembre	(N I)	3,185	10,690
28 Septiembre	(N E)	2,324	7,797

\* Medidas tomadas con aceite como fluido de experimentación

Tabla 13



## 6. Figuras de mérito

Como ya se ha comentado anteriormente, existen ciertas normativas que contemplan las condiciones apropiadas y el proceso a seguir en la caracterización de las cocinas solares. Con los resultados obtenidos hasta este momento, junto con el dato característico de la temperatura de estancamiento, las condiciones experimentales, ambientales y de la propia cocina, puede evaluarse ésta siguiendo las pautas que marca la Norma India de caracterización de cocinas solares.

Pudiendo por tanto calcular dos parámetros recomendados para evaluar el rendimiento de nuestra cocina. Los coeficientes  $F_1$  y  $F_2$  denominados figuras de mérito:

La **primera figura de mérito**, muestra la eficiencia óptica. Es el cociente entre dicha eficiencia óptica y el factor de pérdidas de calor a la temperatura de estancamiento.

$$F_1 = \frac{\eta_o}{U_{LS}} = \frac{T_s - T_a}{I_s \cdot C} \quad (\text{Ec.28})$$

Donde:  $T_s$ : Temperatura de estancamiento (stagnation) ( [K] )

$T_a$ : Temperatura ambiente ( [K] )

$I_s$ : Radiación a la temperatura de estancamiento ( [W/m<sup>2</sup>] )

$C$ : Coeficiente de concentración ( [ ] )

Día		$F_1$ con C1 [ K·m <sup>2</sup> /W ]	$F_1$ con C2 [ K·m <sup>2</sup> /W ]
22 Junio	(N I)	0,0095	0,0335
23 Junio	(N I)	0,0143	0,0552
13 Julio	(N I)	0,0103	0,0364
14 Julio	(N I)	0,0129	0,0455
20 Julio	(N I)	0,0127	0,0447
20 Julio	(N E)	0,0092	0,0326
21 Julio	(N I)	0,0097	0,0343
21 Julio	(N E)	0,0083	0,0294
28 Julio	(N I)	0,0067	0,0236
28 Julio	(N E)	0,0111	0,0391
21 Septiembre	(N E)*	0,0179	0,0630
22 Septiembre	(N E)*	0,0179	0,0630
24 Septiembre	(N E)*	0,0167	0,0588
28 Septiembre	(N I)	0,0112	0,0395
28 Septiembre	(N E)	0,0154	0,0542

\* Medidas tomadas con aceite como fluido de experimentación

Tabla 14

Las figuras de mérito son características de la cocina. En el caso de la primera figura, se comprueba como, aún variando los valores entre ellos debido a que en cada día como ya se ha visto hasta llegar a este punto las condiciones han sido dispares, todos tienen cierta semejanza. La diferencia máxima existente entre ellos es del orden de  $1 \cdot 10^{-2}$ .

Si tuviera que darse un valor concreto de la primera figura de mérito  $F_1$  podría hacerse un promedio entre todos los valores obtenidos:

**F1 = 0,01225**

Si se considerara el coeficiente de captación  $C_2$ , por ser éste menor dado que el área de transmisión considerada es mayor, tendríamos también un coeficiente  $F_1$  de valor más elevado:

$$F_1 = 0,0435$$

Se considera que el valor de  $F_1$  mínimo esperado para cocinas con coeficiente de concentración igual a la unidad sea  $F_1 = 0,1$ . No obstante, teniendo en cuenta que no siempre la radiación incidente es la idónea, y sobretodo que tenemos un coeficiente de concentración de la radiación mayor que la unidad, que implica que no toda la incidente llegue a la olla, los resultados serán siempre menores a este valor.

La **segunda figura de mérito** indica el factor de eficiencia del intercambio de calor.

La norma facilita la ecuación para una cocina solar de tipo caja u horno solar (box cooker), sin espejo reflectante:

$$F_2 = \frac{-F_1 \cdot (m \cdot C_p)_w}{A \cdot t} \cdot \ln \left[ \frac{1 - \frac{1}{F_1} \left( \frac{T_{w2} - T_a}{I_G} \right)}{1 - \frac{1}{F_1} \left( \frac{T_{w1} - T_a}{I_G} \right)} \right] \quad (\text{Ec.29})$$

Teniendo esta expresión desarrollada para un horno solar, resulta sencillo obtener la ecuación apropiada para la cocina de concentración con espejo reflector:

Despejando  $F'$  de la ecuación 17 tenemos

$$F_2 = F' = \frac{-(m \cdot C_p)_w}{A_t \cdot U_L \cdot (t_2 - t_1)} \cdot \ln \left[ \frac{1 - \frac{U_L}{C \cdot \eta_0} \cdot \left( \frac{T_{w2} - T_a}{I_b} \right)}{1 - \frac{U_L}{C \cdot \eta_0} \cdot \left( \frac{T_{w1} - T_a}{I_b} \right)} \right] \quad (\text{Ec.30})$$

Teniendo en cuenta que  $F_1 = \frac{\eta_o}{U_{LS}}$  (Ec 26) y aproximando  $U_L$  por  $U_{LS}$ :

$$F_2 = F' = \frac{-F_1 \cdot (m \cdot C_p)_w}{A_t \cdot (t_2 - t_1)} \cdot \ln \left[ \frac{1 - \left( \frac{T_{w2} - T_a}{F_1 \cdot C \cdot I_b} \right)}{1 - \left( \frac{T_{w1} - T_a}{F_1 \cdot C \cdot I_b} \right)} \right] \approx \eta_0 \quad (\text{Ec.31})$$

Si se ensaya la cocina solar de caja (box cooker) sin reflector,

$$\begin{aligned} \eta_0 &= 1 \\ C &= 1 \\ I_b &= I_G \\ A_t &= A \end{aligned}$$

Y con estas consideraciones se llega a la expresión 27 que proporciona la norma para los hornos solares.



Donde:  $T_a$ : Temperatura ambiente ( [K] )  
 $C$ : Coeficiente de concentración ( [ ] )  
 $m$ : masa de agua ( [kg] )  
 $C_p$ : calor específico del agua a presión constante ( [J/(kg K)] )  
 $T_{w1}$ : Temperatura del agua, valor al comienzo del calentamiento ( [K] )  
 $T_{w2}$ : Temperatura del agua, valor al final del calentamiento ( [K] )  
 $t$ : Tiempo ( [s] )  
 $A_c$ : Área de captación de la cocina ( [m<sup>2</sup>] )  
 $A_t$ : Área de transmisión, área de la olla que recibe calor de la cocina ( [m<sup>2</sup>] )  
 $\eta_0$ : Rendimiento óptico de la cocina ( [ ] )  
 $I$ : Radiación en el intervalo de evaluación de la temperatura (1-2) ( [W/m<sup>2</sup>] )  
[En el calentamiento]

Día de experimento	F <sub>2</sub> con C1[ ]	F <sub>2</sub> con C2[ ]
22 Junio	-	0,136
23 Junio	-	-
13 Julio	-	0,090
14 Julio	-	0,161
20 Julio	-	0,344
20 Julio	0,314	0,083
21 Julio	-	0,121
21 Julio	0,322	0,104
28 Julio	-	0,100
28 Julio	0,530	0,158
21 Septiembre*	-	0,174
22 Septiembre*	0,327	0,097
24 Septiembre*	0,948	0,173
28 Septiembre	-	0,129
28 Septiembre	0,382	0,382

\* Medidas tomadas con aceite como fluido de experimentación

Tabla 15

La segunda figura de mérito, presenta una ecuación dependiente de muchos factores muy variables a lo largo del experimento.

Depende de la primera figura de mérito, que como ya se ha demostrado. a pesar de que su variación entre los diferentes días no es grande, sí influye en el cálculo de ésta segunda figura de mérito. Depende además de otros factores muy dispares como son el tiempo de calentamiento, las temperaturas iniciales y finales de calentamiento, tanto del agua como del ambiente, y la radiación media. Parámetros los cuales presentan valores que podemos considerar semejantes independientemente de los días o del fluido del ensayo.

A esta afirmación debe añadirse una excepción. El 24 de septiembre, se registra un valor máximo. En este caso coincide que el tiempo invertido en alcanzar la temperatura máxima fue mínimo, y a su vez esa temperatura muy elevada. Y dado que el factor F<sub>2</sub> viene inversamente relacionado con el tiempo empleado, puede ser una justificación a ese valor extremo y atípico.

Una vez obtenido este valor, puede emplearse para comprobar la aproximación realizada con el coeficiente de pérdidas.

En una primera aproximación, se calculó el factor de pérdidas según el estancamiento, para el desarrollo de la segunda figura de mérito según la norma hindú. Para poder alcanzar resultados, aproximamos el valor de  $U_L$  por  $U_{LS}$  a la temperatura de estancamiento.

Se observa como el cálculo en el estancamiento nos proporciona los siguientes resultados recogidos previamente en la tabla 13.

Día de experimento		$(F'U_L)_s$ [ W/m <sup>2</sup> K ]
22 Junio	(N I)	12,608
23 Junio	(N I)	7,654
13 Julio	(N I)	11,046
14 Julio	(N I)	9,292
20 Julio	(N I)	9,445
20 Julio	(N E)	11,908
21 Julio	(N I)	12,317
21 Julio	(N E)	14,399
28 Julio	(N I)	17,927
28 Julio	(N E)	10,822
21 Septiembre	(N E) *	6,709
22 Septiembre	(N E) *	6,709
24 Septiembre	(N E) *	8,174
28 Septiembre	(N I)	10,690
28 Septiembre	(N E)	7,797

\* Medidas tomadas con aceite como fluido de experimentación

Tabla 16

El resultado obtenido del cálculo real del factor de pérdidas se muestra en la tabla 10 y se representa de nuevo a continuación para ver la comparación.

	Factor de pérdidas con $t_0$ experimental $F' \cdot U_L$ [ W/m <sup>2</sup> K ]	Factor de pérdidas con $t_0$ gráfico $F' \cdot U_L$ [ W/m <sup>2</sup> K ]
Con agua	4,304	3,325
Con aceite	2,103	2,275

Tabla 17

De los resultados que se obtienen a partir de los valores obtenidos experimentalmente, se concluye que a pesar de que la aproximación no resulta del todo exacta, las diferencias son atribuibles a los factores de ensayo, la posible inexactitud de las medidas, errores de experimentación como la falta de datos en el enfriamiento, proceso influyente en el resultado del coeficiente de pérdidas, así como la variabilidad sufrida en las condiciones los días ensayados.

## 7. Tiempo de ebullición

El tiempo de ebullición puede estimarse integrando la ecuación 19 considerando que en ese tiempo se alcanza la temperatura de ebullición. Esta temperatura está tabulada y depende de la presión atmosférica y de la altitud del lugar en el que se experimenta. Para Madrid se podría considerar que esa temperatura es de 97°C para el agua. Teniendo en cuenta estas consideraciones se llega a una expresión que indica el tiempo de ebullición.

$$t_{eb} = -t_0 \cdot \ln \left[ 1 - \frac{F' \cdot U_L}{C \cdot \eta_0 \cdot I_b} \cdot (97 - T_a) \right] \quad (\text{Ec. 32})$$

Considerando para  $I_b$  y  $T_a$  valores medios de todos los datos recogidos en ese día de ensayo.

Día de experimento	$t_{eb}$ (con $t_0$ teórico) [s]	$t_{eb}$ (con $t_0$ experimental) [s]
22 Junio	680,64	692,05
23 Junio	1180,97	912,41
13 Julio	660,96	671,70
14 Julio	730,00	743,18
20 Julio	905,41	926,01
21 Julio	852,65	870,84
21 Julio	598,53	607,28
28 Julio	744,30	758,02
28 Julio	574,28	582,32
28 Septiembre	1037,52	1064,90
28 Septiembre	697,02	709,00
<b>PROMEDIO</b>	<b>787,48</b>	<b>776,16</b>

Tabla 18

El tiempo de ebullición depende del valor de los parámetros que contiene la ecuación. En este desarrollo se considera que el tiempo necesario para alcanzar la ebullición es excesivamente bajo. De la observación se puede concluir que son necesarios tiempos mayores para que el agua entre en ebullición.

El motivo de estos resultados tan pequeños, puede ser principalmente el valor obtenido de tiempo de enfriamiento del cual depende. En el estudio no se consiguieron valores suficientes para muestrear de forma totalmente apropiada el enfriamiento. Este hecho provoca que los parámetros dependientes de estos valores se vean afectados negativamente. Esto es lo que puede ocurrir con el factor de pérdidas del cual también depende este tiempo de ebullición y esto implica una concatenación de errores dada la inexactitud de los parámetros empleados.

## 8. Rendimiento

Un resultado interesante de conocer, es el valor del **rendimiento o eficiencia** de la cocina. Valor que viene dado a partir de la siguiente expresión:

$$\eta_{\max \text{ COCINA}} = \frac{\dot{Q}_{\max}}{I_{b\_m\acute{a}x} \cdot A_C} \quad (\text{Ec.33})$$

La eficiencia viene por tanto dada por el cociente entre la potencia obtenida por la cocina, y la potencia empleada.

Esta última, la potencia empleada es la radiación solar incidente multiplicada por el área de captación.

Como ya se ha comentado anteriormente, para superficies planas, la radiación incidente es directamente la radiación global; para superficies parabólicas se considera la radiación directa incidente en la superficie de apertura, según la inclinación de ésta.

Día de experimento		Rendimiento máximo [ ]
22 Junio	(Norma India)	0,274
23 Junio	(Norma India)	0,227
13 Julio	(Norma India)	0,160
14 Julio	(Norma India)	0,247
20 Julio	(Norma India)	0,248
20 Julio	(Norma europea)	0,093
21 Julio	(Norma India)	0,069
21 Julio	(Norma europea)	0,201
28 Julio	(Norma India)	0,094
28 Julio	(Norma europea)	0,215
21 Septiembre	(Norma europea)*	0,359
22 Septiembre	(Norma europea)*	0,147
24 Septiembre	(Norma europea)*	0,302
28 Septiembre	(Norma India)	0,096
28 Septiembre	(Norma europea)	0,367

\* Medidas tomadas con aceite como fluido de experimentación

Tabla 19

<b>VALOR PROMEDIO</b>	<b>0,207</b>
-----------------------	--------------

Se puede ver que el rendimiento también varía según las diferentes condiciones ambientales, el viento, la radiación, la nubosidad, y experimentales, como el fluido de trabajo, la presencia o no de la tapa, etc.

Si no se consideran los valores extremos ni los obtenidos con aceite:  $\eta_{\max} = 0,242$

Si se consideran únicamente los valores obtenidos con aceite:  $\eta_{\max} = 0,331$

(Descartando en este último caso, el día 22 de septiembre por tener un valor atípico, consecuencia de haberlo obtenido con ausencia de tapa)





A pesar de la variabilidad, el rendimiento, exceptuando casos atípicos, mantiene unos valores bastante similares en todos los días de experimentación.

Considerando la potencia y radiación medias, se puede obtener un valor medio del rendimiento de la cocina.

$$\bar{\eta}_{COCINA} = \frac{\dot{Q}_{med}}{\bar{I}_b \cdot A_C} \quad (\text{Ec.34})$$

## Análisis de resultados

### Comparación de la potencia máxima

Si se analiza la tendencia de la potencia máxima que alcanza la cocina en el período de toma de datos, puede comprobarse como viene influida por la evolución en esos mismos días de la potencia que recibe del Sol. A su vez, se observa como la aproximación considerada, se ajusta bastante a la situación real.

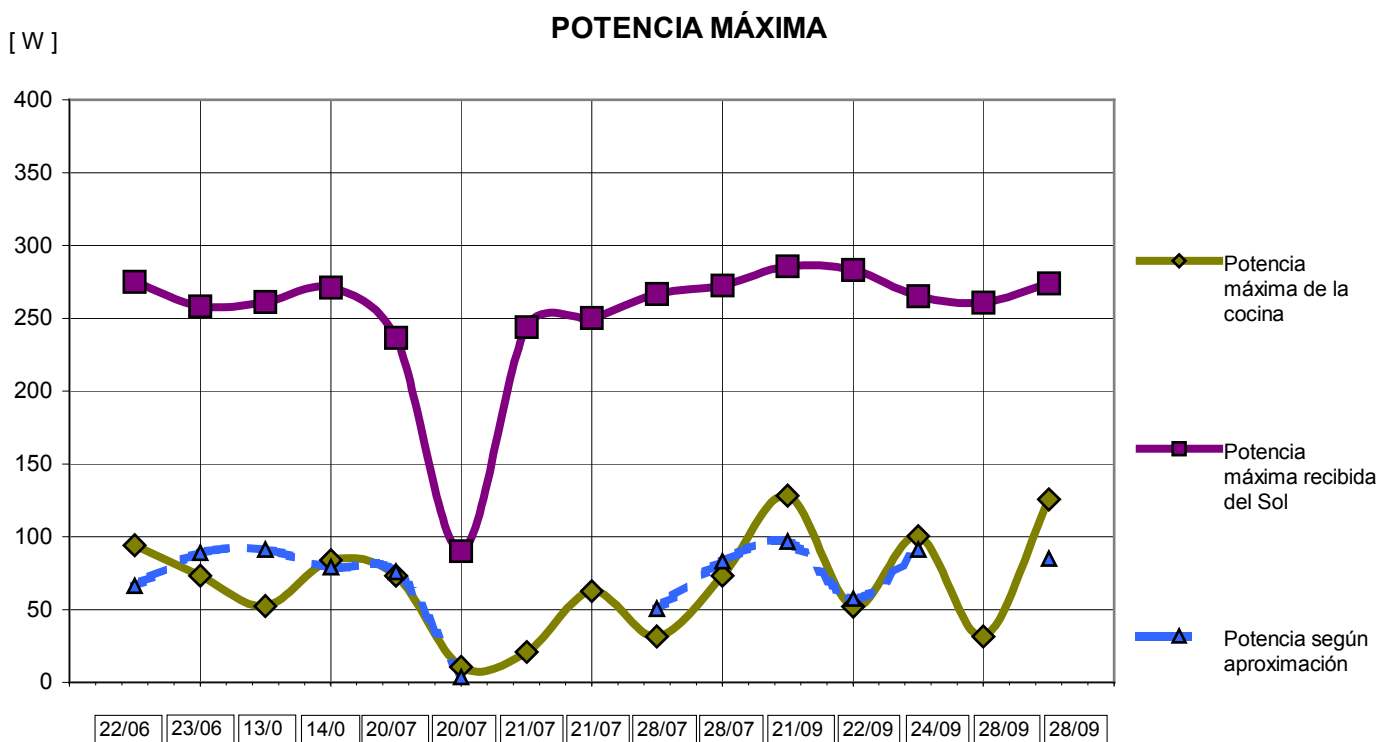


Figura 19. Representación de la potencia máxima recibida del Sol frente a la potencia máxima alcanzada con la cocina junto con los valores obtenidos de las aproximaciones de primer o segundo grado realizadas (según corresponda)

Centrándose en los resultados que nos muestra la figura, se observa esencialmente dos datos extremos que conviene comentar:

En primer lugar existe un pico mínimo de la potencia solar, que influye también en un mínimo de potencia alcanzada por la cocina. Este pico se debe a un día muy nublado, y por tanto de muy baja radiación tanto directa como global.

En segundo lugar, destacan picos máximos en la potencia alcanzada por la cocina. Estos valores máximos se corresponden a dos de los días que se experimento con aceite como fluido de trabajo.

Destaca además, que los valores más elevados se dan en los últimos datos. Algunos de estos datos son recogidos cuando se utilizó aceite como fluido de trabajo. A este factor se le añade el hecho de que estos resultados se obtuvieron siguiendo la norma europea, según la cual el

experimento se realiza entre una hora antes, y una hora después del medio día solar, cuando la radiación es máxima. Por esto estos días la cocina presentó mejores resultados.

## Comparación de las normas India y Europea

Las normas difieren en cuanto a los procedimientos de ensayo y también en cuanto a sus finalidades.

Por su parte la Norma India, presenta como objetivo la obtención de dos figuras de mérito que puedan dar un conocimiento de la capacidad térmica de la cocina, lo más independiente posible de las condiciones meteorológicas, así como la descripción de una curva que establecida una temperatura de referencia, proporcione el tiempo invertido en alcanzar dicha temperatura.

En cambio, la Norma Europea, se centra exclusivamente en experimentar con diferentes condiciones de ensayo y así muestrear la evolución de la temperatura según diferentes planteamientos iniciales. Así como la Norma India, no especificaba franja horaria en la que actuar para los experimentos, la Norma Europea, indica que los registros se hagan en torno al medio día solar. Según este estándar deben tomarse medidas en una ocasión precalentando el agua, en otra sin precalentar, empleando aceite precalentado, dejando enfriar los fluidos y recogiendo el tiempo empleado en perder ciertos grados...

En resumen, la Norma Europea impone unas condiciones de trabajo específicas en un horario específico y recoge los tiempos invertidos; mientras que la Norma Hindú se centra principalmente en el estudio de los resultados, por medio de ciertos parámetros en ella definidos.

Pueden compararse los resultados obtenidos con la cocina según si el experimento se realizó siguiendo las pautas descritas por la norma India o por la Europea, ya que cada una de ellas se basan en unas condiciones de medida específicas, sintetizadas anteriormente.

Analizando las características principales de la cocina, puede comenzarse mostrando la diferencia obtenida en la potencia neta de la misma.

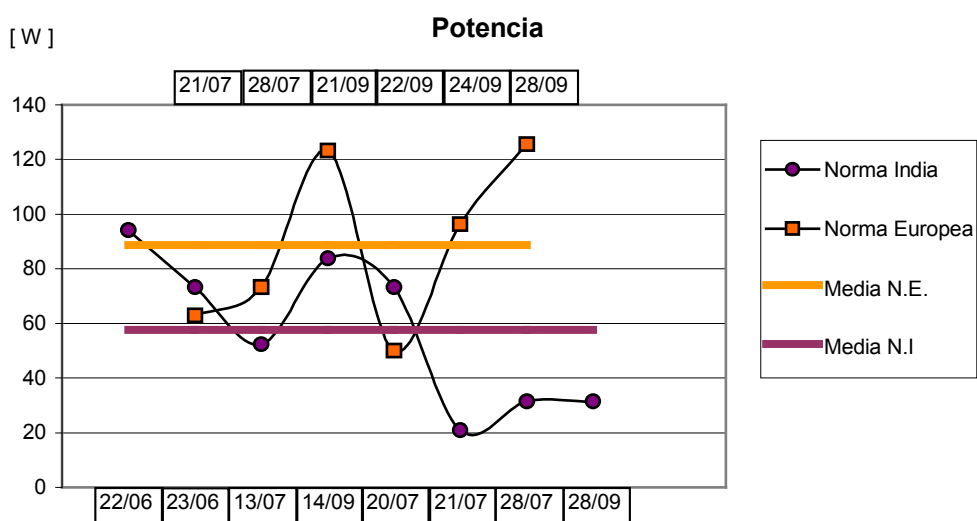


Figura 20. Gráfico representativo de la potencia alcanzada según las normas europeas e india.

Observando la curva representada según uno y otro estándar, se puede apreciar como, destacan pronunciadas fluctuaciones entre cada uno de los días de experimentación. Esto es debido a las diversas condiciones de cada uno de los días de experimentación. Sin embargo, resalta también

cómo la media de los valores obtenidos con la norma europea, supera a los obtenidos según la India. Aunque se aprecien resultados variables, en términos generales, la norma europea aparece por encima en la gráfica, por lo que la potencia obtenida en los períodos de experimentación de esta norma, es mayor.

En cuanto al rendimiento sucede algo similar. En un primer análisis se concluye que la norma europea ofrece mayores rendimientos en la utilización de la cocina solar. En este caso la diferencia no es muy destacable, ya que dentro de los valores obtenidos en condiciones adecuadas, la norma europea tiene valores muy dispares, lo que implica que aún habiendo valores más elevados que el resto en comparación, otros valores notablemente bajos dejan el rendimiento en un valor próximo al que presenta la norma india.

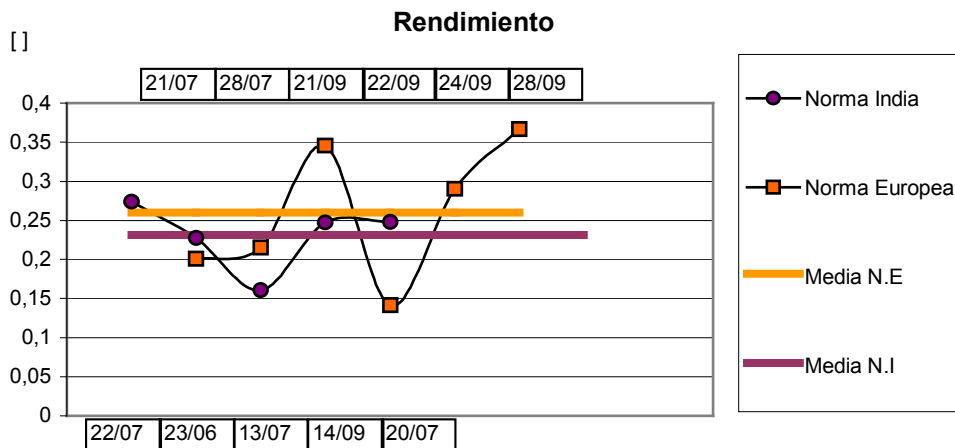


Figura 21. Gráfico representativo del rendimiento que presenta la cocina comparativamente según las normas europeas e india.

Si se pretende comparar los valores de temperatura de estancamiento alcanzados en cada uno de los casos, partiendo igualmente de la base, de que ésta depende, como todo en la cocina solar, de las condiciones atmosféricas presentes el día de ensayo.

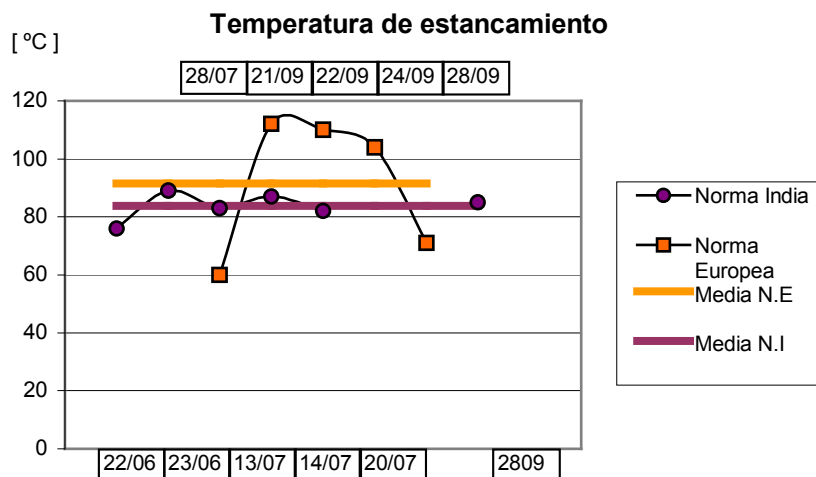


Figura 22. Gráfico comparativo de la temperatura de estancamiento según las normas europeas e india.

En este caso en el que se observa el comportamiento de la temperatura de estancamiento, resalta cómo en término medio, las temperaturas alcanzadas son también mayores siguiendo las condiciones impuestas por la norma europea. Bien es cierto, que en este caso, las diferencias existentes, que incrementan el promedio de la norma europea, vienen dadas por la experimentación realizada con aceite como fluido de trabajo. Ya se ha visto en otros puntos de este trabajo, como las temperaturas registradas con este fluido, eran considerablemente superiores aún con similares condiciones de trabajo.

### Comparación de días soleado y nublado

Un factor fundamental a la hora de estudiar y utilizar una cocina solar, el tiempo atmosférico. Este viene determinado por diversos parámetros como la temperatura, humedad, viento, nubosidad, etcétera.

Por ello, resulta revelador comparar los resultados obtenidos en un día muy soleado y especialmente caluroso, con respecto a otro con elevada nubosidad. Representando a continuación los parámetros medidos en ambos días para su comparación.

El día despejado, 28 Julio de 2009, se representa con círculos, mientras que el día cubierto, 20 Julio de 2009, aparece representado con cuadrados.

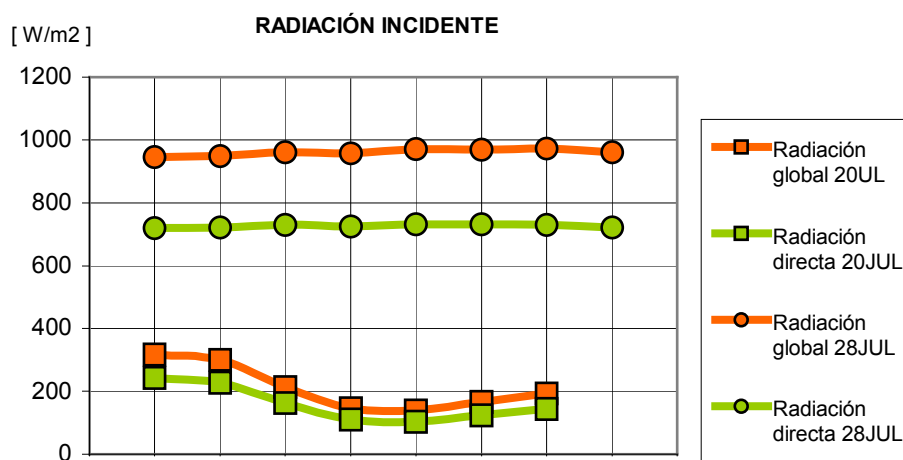


Figura 23. Comparativa de la radiación incidente global y directa de un día soleado y otro nublado

Puede comprobarse como la radiación global, al igual que la directa, son mucho menores en un día nublado con el 20 de Julio.

También se observa como al ser la radiación global tan baja, la diferencia con la directa no resulta tan apreciable como en el caso de un día soleado como lo fue el 28 de Julio en el que se aprecia notablemente el efecto de la radiación difusa.

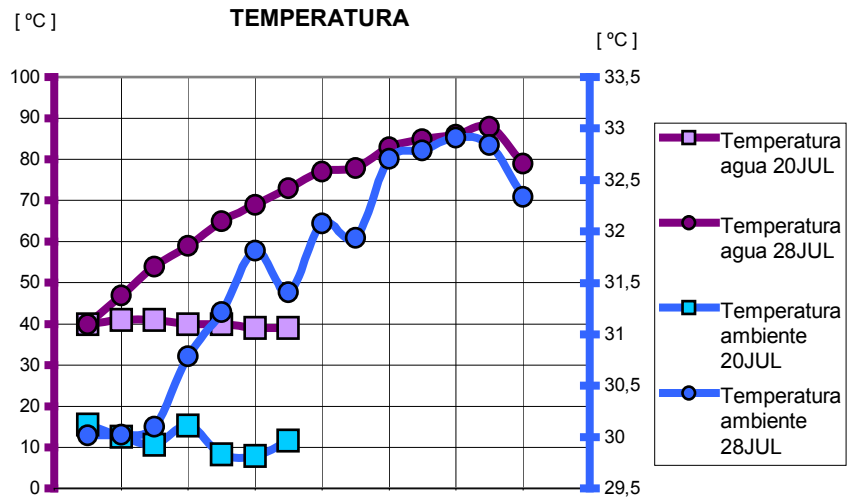


Figura 24. Representación gráfica de la evolución de la temperatura del agua y la temperatura ambiente comparativamente de dos días uno soleado y otro nublado

En cuanto a los valores de temperatura también se aprecian diferencias notables.

En primer lugar comparando en ambos días la temperatura ambiente, destaca la estabilidad de la misma en el día nublado, mientras que el día soleado experimenta un ascenso de la temperatura en función del tiempo.

En cuanto a la temperatura del agua sucede algo similar. Los valores van más o menos paralelos a los de la temperatura ambiente. En el caso del día nublado, al no llegar suficiente radiación no suben ni la temperatura ambiente ni la del agua. Por el contrario, el segundo día que se analiza, como tuvo una radiación elevada, permitió la subida de la temperatura del agua, así como la ambiente. Cabe comentarse también como en éste día, tras alcanzarse la temperatura de estancamiento, se experimenta un leve subida de temperaturas y posterior enfriamiento, de carácter brusco.

Debido a las malas condiciones ambientales del día 20 de Julio, se cortó el experimento dado que no se daba la situación idónea para funcionar.

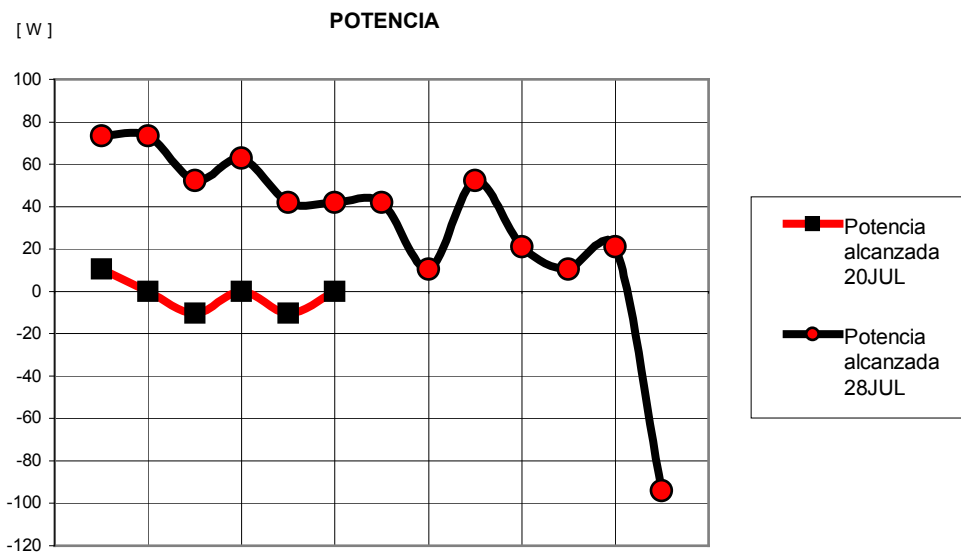


Figura 25 Gráfico comparativo de la potencia alcanzada en un día soleado frente a la misma en otro nublado.



En cuanto a la potencia, se comprueba lo esperado. La presencia de nubosidad interfiere en la captación de radiación por parte del reflector de la cocina, por lo cual no se alcanzan los resultados deseados.

Comparando los valores con los de otro día con mejores condiciones climáticas, se observan mejores resultados a pesar de la importante influencia del enfriamiento presente al final del experimento.

### Comparación de resultados con agua y aceite

El fluido de trabajo tiene gran relevancia a la hora de caracterizar y estudiar la capacidad de una cocina solar.

Debido a las propiedades que tienen cada uno de los fluidos, el comportamiento ante un período de exposición a la radiación solar es claramente distinto.

En este estudio, comparando los resultados obtenidos al utilizar agua, con los que resultan al emplear aceite, se destaca lo siguiente:

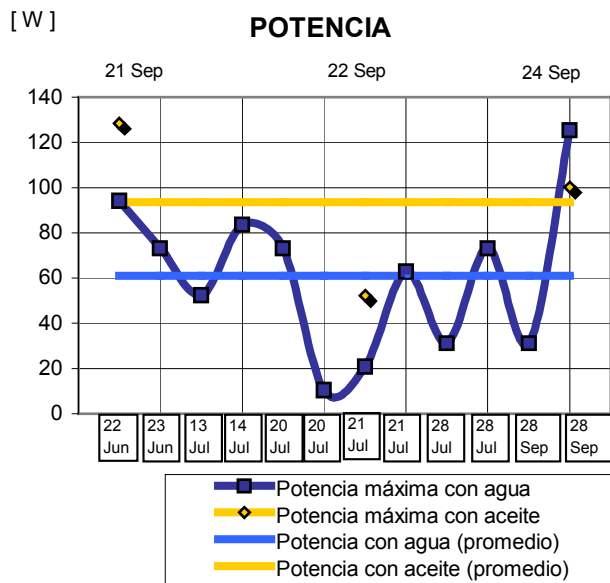


Figura 26. Potencia obtenida con agua y con aceite.

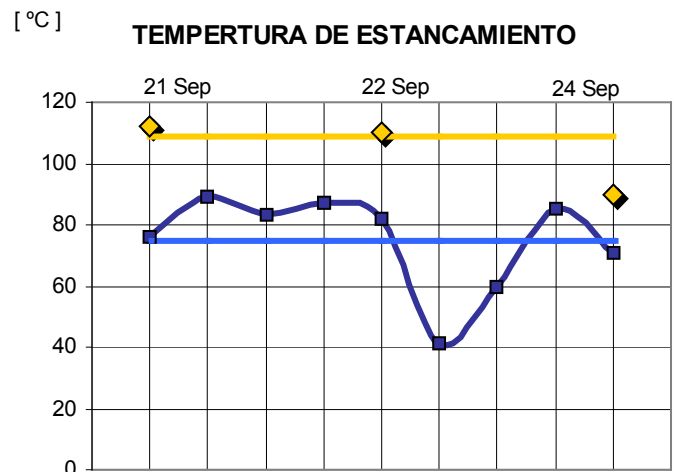


Figura 27. Temperatura de estancamiento alcanzada en los ensayos con agua o con aceite

En las representaciones de la potencia alcanzada y de la temperatura de estancamiento, se observa comparativamente entre agua y aceite, un mismo comportamiento en ambos parámetros. Se concluye fácilmente de la observación, que el aceite consigue mayores valores de potencia, y así mismo mayor temperatura de estancamiento, lo cual puede asociarse a su mayor temperatura de ebullición.

En ambos gráficos se observan dos puntos atípicos mínimos en los resultados obtenidos con agua, que se corresponden con el día 20 de Julio, que como ya se ha analizado anteriormente, fue un día de malas condiciones térmicas y climatológicas. Por lo tanto se desprecian los resultados obtenidos en este día.

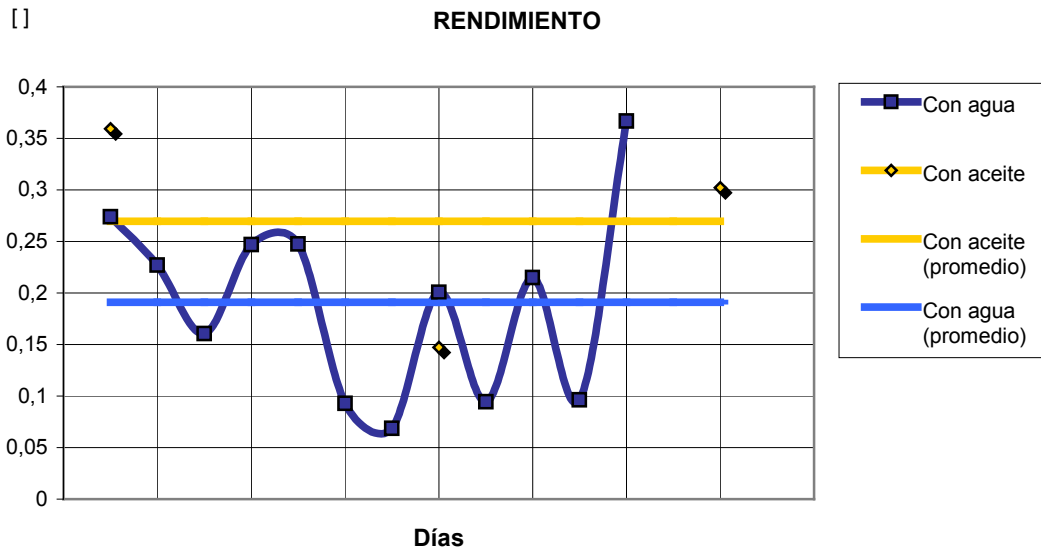


Figura 28. Gráfico representativo del rendimiento que presenta la cocina comparativamente según se utilice agua o aceite como fluido en la cocina cada uno de los días de ensayo.

Como consecuencia de las mejores condiciones y resultados en la utilización del aceite como fluido, el rendimiento que presenta la cocina es claramente superior al que puede conseguirse cuando se emplea agua.

De todas formas se observa que en todos estos valores obtenidos en el ensayo con aceite, aparece uno notablemente más bajo a los otros dos datos recogidos. Estos datos se corresponden en todos los casos a los obtenidos el día 22 de septiembre. Se adivina que se debe a que aún siendo un día de elevada radiación, la cocina tardó más que el resto de los días en elevar su temperatura, por ello, presenta valores de potencia y rendimiento menores. Eliminando ese dato como atípico, por ser las condiciones diferentes, la cocina alcanza como resultado un rendimiento promedio en los ensayos con aceite, más elevado; pasando de un valor de 0,27 a otro de 0,33.

Algo similar ocurre con el agua. En este caso aparece un valor anormalmente elevado del rendimiento el día 28 de septiembre, cuando se ensayó la norma europea partiendo de agua sin precalentar a los 40° que establece dicha norma. Por eso, prescindiendo también de ese dato, tenemos en este caso un valor promediado de los ensayos realizados con agua, que cambiará de 0,19 a 0,17.

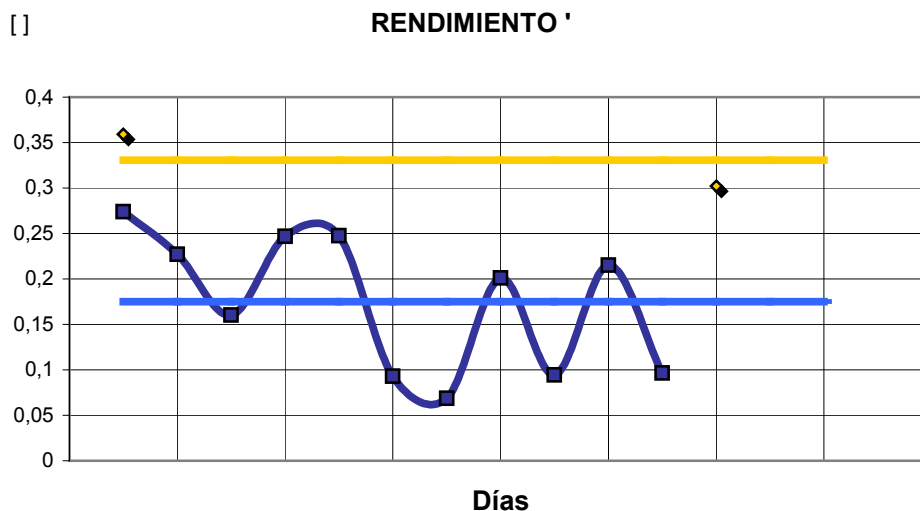


Figura 29 Gráfico representativo del rendimiento que presenta la cocina comparativamente según se utilice agua o aceite como fluido en la cocina, sin considerar el dato atípico del aceite y el máximo del agua.

Se puede terminar diciendo, que los experimentos con aceite difieren enormemente en los resultados obtenidos con respecto al agua. La cocina presenta una tendencia diferente si utilizamos uno u otro fluido.

No obstante, a título personal y basándome en la experimentación y lo observado durante la misma, a pesar de la mejora indiscutible, la cocina no es capaz de freír, pues necesita valores más altos de temperatura (de unos 200°C), mientras es totalmente apta para hervir y cocer.

### Comparación de resultados en la cocina con tapa y sin tapa

En todos los diferentes ensayos realizados (norma india, norma europea, con agua, con aceite...), se llevaron a cabo medidas en alguno de los días, sin la utilización de la tapa. Esto nos indicará la importancia de su uso.

#### En la Norma India:

Se empieza comparándose los valores de potencia y rendimiento de la cocina, en los días que se practicó la norma india. Analizando los días en los que se tuvo la tapa de la olla puesta, en comparación con un día en el que no se puso dicha tapadera.

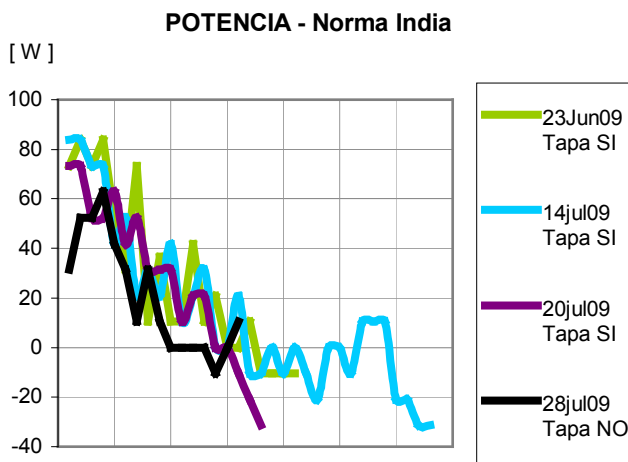


Figura 30. Potencia alcanzada por la cocina según la norma india para comprobar la influencia del uso de la tapa en días con condiciones apropiadas.

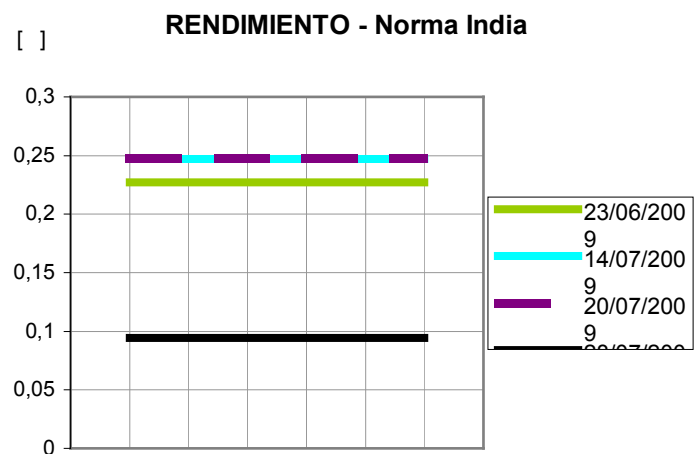


Figura 31. Rendimiento de la cocina conseguido siguiendo la norma india con y sin tapa en días con buenas condiciones

Se puede comprobar en la muestra superior, como el día que no se utilizó la tapa, los resultados fueron apreciablemente peores que en los días en los que sí se hizo uso de la tapa. Tanto en la gráfica de la potencia como en la del rendimiento de la cocina, el día 28 de julio, que fue el día que no se utilizó tapadera, aparece por debajo en los resultados. De forma muy clara aparece con un rendimiento peor, y a pesar de las fluctuaciones presentes en los valores de la potencia, también es clara la desventaja presentada frente al resto de los días. Concluyéndose por tanto cuan importante resulta concentrar el calor en el interior del recipiente, tapándolo de forma apropiada, dado que si no, las pérdidas y consecuente ineficiencia son considerables.

Teniendo en cuenta también el resto de los días con condiciones adversas, aun siendo tan importante la condición atmosférica presente, se advierte que los resultados pueden ser falseados y entendidos de manera errónea.

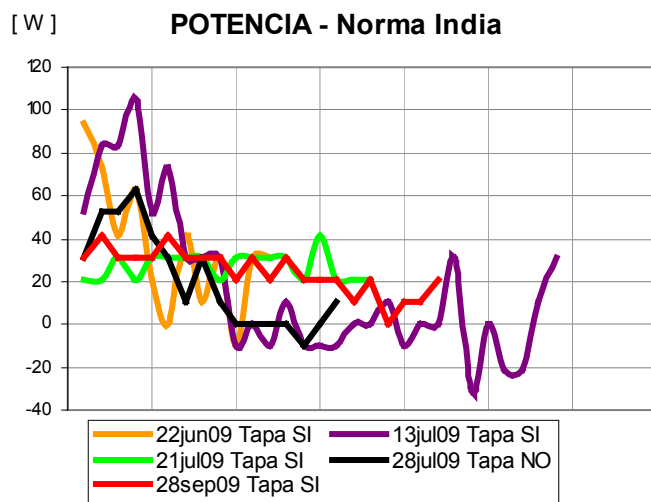


Figura 32. Potencia alcanzada por la cocina según la norma india para comprobar la influencia del uso de la tapa en días con condiciones poco apropiadas.

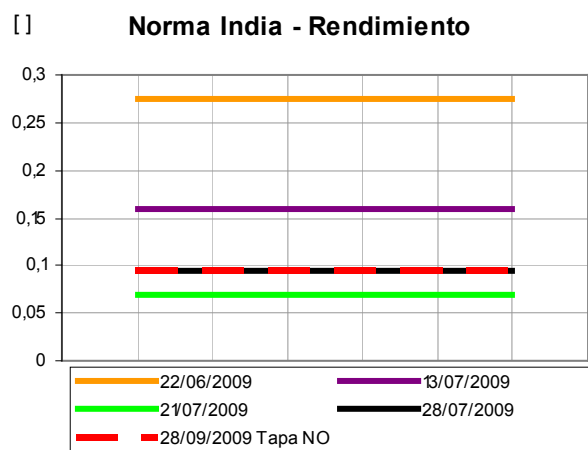


Figura 33. Rendimiento de la cocina conseguido siguiendo la norma india con y sin tapa en días con malas condiciones

Por este motivo, se han separado los días que tuvieron condiciones especiales y los comentamos a continuación.

Se observan en las dos situaciones como el 28 de Julio, día sin tapa, sigue apareciendo como uno de los días con peores resultados. No obstante cabe destacar como otros días también presentan valores iguales o incluso peores.

Así por ejemplo, el 21 de Julio, a pesar de ser un día en el que el ensayo se realizó con la olla tapada, las condiciones atmosféricas no eran las adecuadas, el cielo no estaba despejado del todo, y la radiación directa que llegaba era más baja. Esto propició que este día la temperatura del agua tardara más en subir y por tanto su potencia se vio negativamente aceptada y consecuentemente el rendimiento.

En cuanto a otro de los días, el 28 de Septiembre, se entiende que sucedió algo parecido, a pesar de que en este caso fue un día despejado, apareció otro fenómeno atmosférico que afectó al ensayo, el viento. Fue un día con viento superior a los 2,5 m/s en su totalidad. Los procedimientos contemplan la condición de que la velocidad del viento no debería exceder los 2,5 m/s durante más de 10 minutos en el proceso de toma de medidas.

Este factor sumado a valores de temperatura ambiente mucho inferiores al resto de los días ensayados, pudieron provocar mayores pérdidas que se ven reflejadas en la comparación.

Los otros dos días que aparecen, a pesar de las fluctuaciones, presentan mejores condiciones de trabajo y mejores resultados.

#### En la Norma Europea:

Se continúa analizando el efecto de la tapadera, en el resto de las condiciones contempladas a la hora de tomar las medias oportunas para caracterizar el funcionamiento de nuestra cocina. Pasando a descubrir si al seguir las pautas descritas en la norma europea, la consideración de la tapadera es tal como ha resultado en el procedimiento de la norma india.

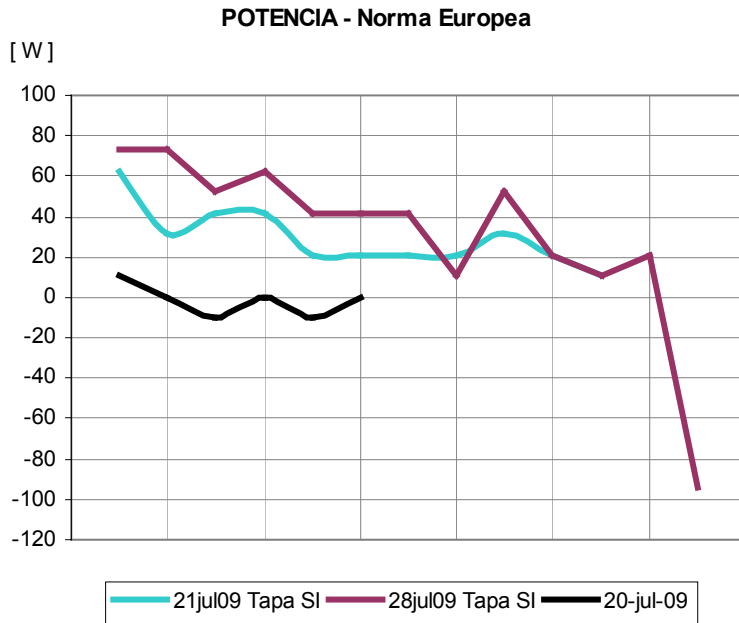


Figura 34. Potencia alcanzada por la cocina según la norma europea para comprobar la influencia del uso de la tapa en los ensayos con agua.

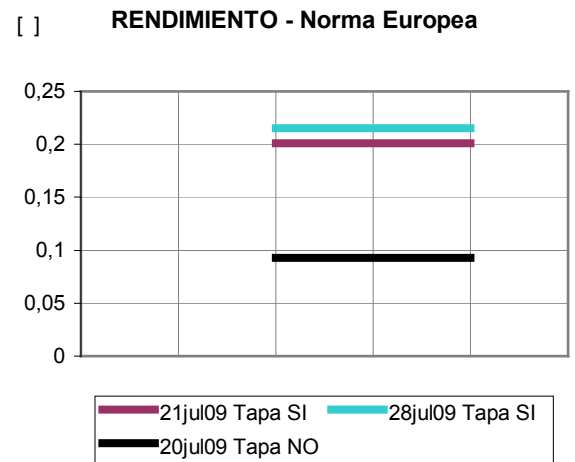


Figura 35. Rendimiento de la cocina conseguido siguiendo la europea ensayando con agua con y sin tapa.

Se observa como de igual manera, en este caso resulta también imprescindible el uso de la tapa en la cocina. Bien es cierto, que el único día en que se experimentó la norma europea sin tapa, el 20 de Julio, ya sabemos que fue un día con malas condiciones climatológicas, pero aún así el efecto se ve incrementado por la ausencia de tapa.

En la Norma Europea, con aceite como fluido:

Considerando por último la comparación para los días en los que se empleó el aceite, podemos observar, resultados ligeramente diferentes. Ya sabemos que la experimentación con aceite muestra diferencias muy notables en la mayoría de las situaciones comparadas con agua.

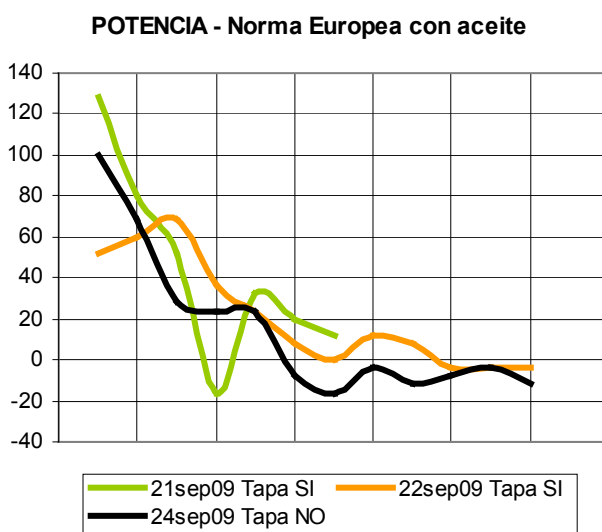


Figura 36. Potencia alcanzada por la cocina según la norma europea para comprobar la influencia del uso de la tapa en los ensayos con aceite.

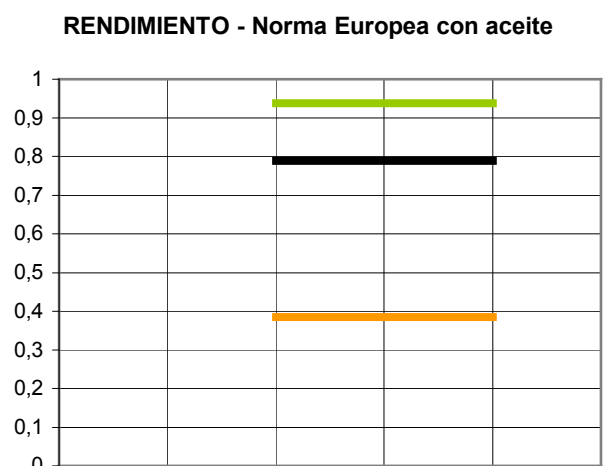


Figura 37. Rendimiento de la cocina conseguido siguiendo la europea ensayando con aceite con y sin tapa.

Ante estos resultados se ve como sí puede influir la condición de tapar o no la olla, pero no como en los demás casos. En esta situación, las diferencias no son tan notables al comparar la potencia alcanzada por la cocina. Mucho menos en el caso de analizar el rendimiento, dado que el día en el que no se empleó la tapa presenta un rendimiento mayor que otro, que con condiciones favorables, presenta un rendimiento mucho menor.

En este caso los valores, que si pueden hacer considerar importante la tapa, son las temperaturas máximas alcanzadas y de estancamiento en cada uno de los días.

	TEMPERATURAS MÁXIMAS	TEMPERATURAS DE ESTANCAMIENTO
21 Septiembre	117°C	112°C
22 Septiembre	110°C	110°C
24 Septiembre (Tapa NO)	104°C	104°C

Tabla 19

### Evolución general de los experimentos

Para realizar un análisis de la comparación de la evolución de la temperatura, consideramos oportuno separar los días en los que se evaluó la norma india de los que se evaluó la europea. Esto es así puesto que las condiciones iniciales de temperatura del agua, así como la hora de comienzo del ensayo, y por tanto la radiación inicial incidente, son distintos; y estos son factores que presentan gran importancia en el comportamiento final de la cocina.

### **Evolución de calentamiento con Norma India**

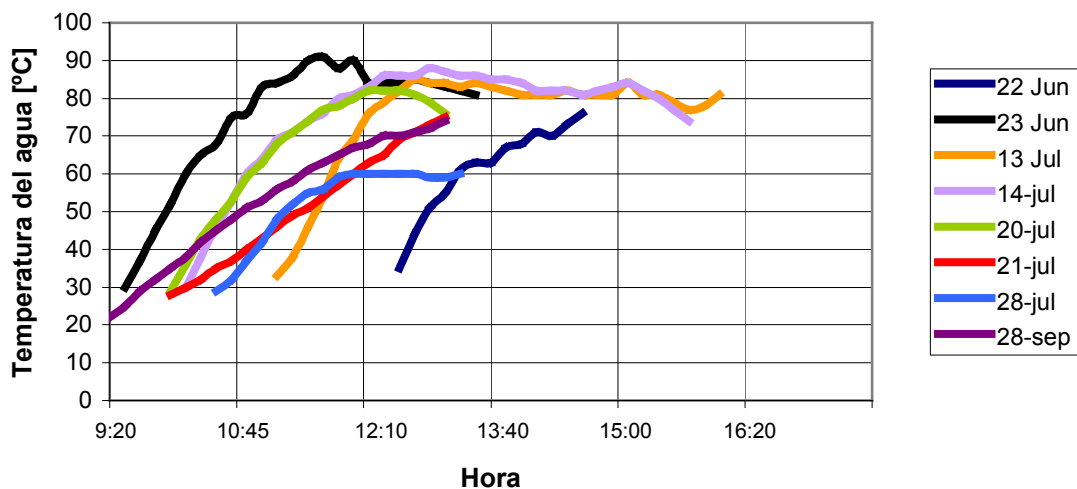


Figura 38. Calentamiento del agua según las directrices de la norma hindú.



Se observa, en este primer caso, como independientemente de la hora o del día de la toma de medidas, prácticamente todos los resultados siguen una misma tendencia y alcanzan unos valores de temperatura máximos entre los 75-90°C. Como es de esperar, aparecen excepciones de días que generalmente, y ya lo hemos visto con anterioridad, se deben a casos atípicos e inestables de las condiciones meteorológicas.

Sin embargo, comparando los días en los que seguimos la norma europea, y aún despreciando el día 20 de Julio por sus ya conocidas nefastas condiciones, se comprueba como los resultados son más dispares. Esto se explica teniendo en consideración el hecho de que se emplearan diferentes fluidos de experimentación, con diferentes capacidades térmicas, y como se ha visto a lo largo del estudio, su comportamiento presentó ciertas diferencias. Se comprueba no obstante como los días 21, 28 de Julio y 28 de Septiembre (representados en azul, rojo y morado) siguen una misma tendencia, viendo como la pendiente de la curva que dibujan cada uno de ellos es muy similar.

Si se compara así mismo la evolución experimentada con cada uno de los fluidos, se distingue un calentamiento más rápido en el caso del aceite (curvas: negra, naranja y violeta), observándose una mayor pendiente en la curva de la evolución de su temperatura, frente a la pendiente que se obtiene de los datos recogidos con agua como fluido de experimentación.

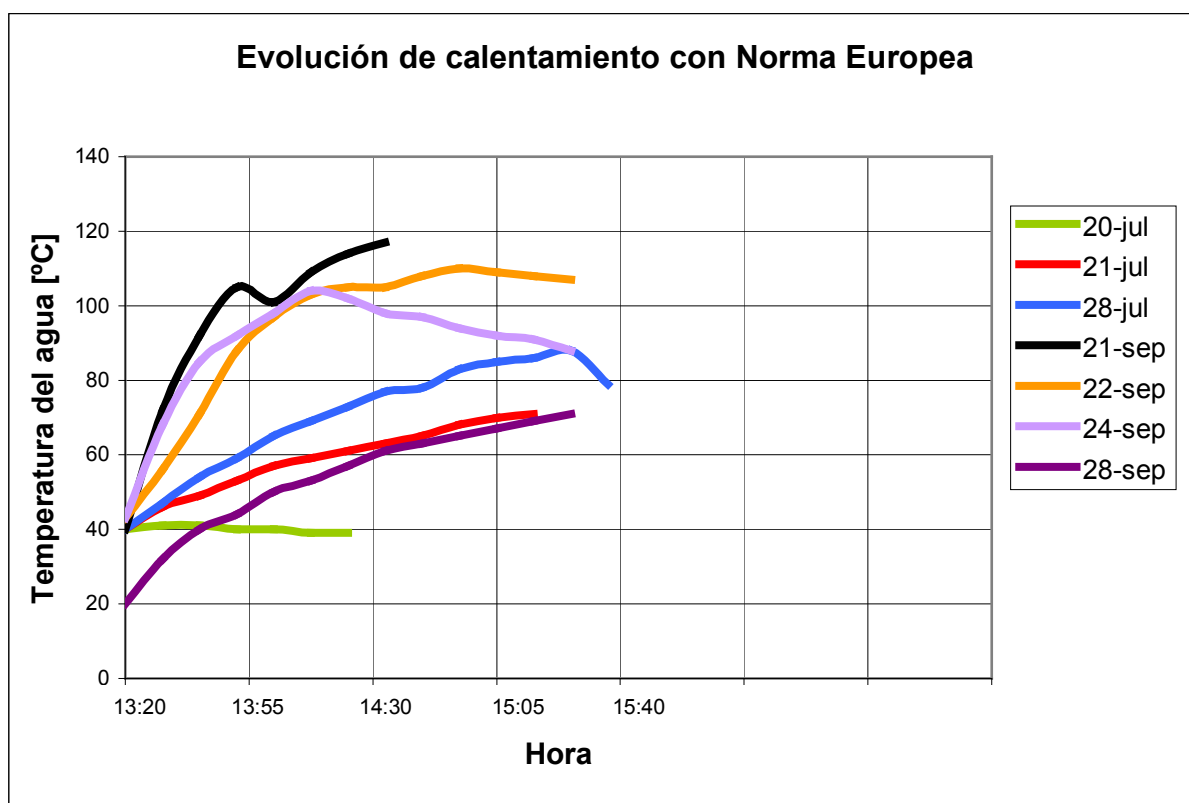


Figura 39. Calentamiento según la norma europea.

A partir de los datos recogidos, resulta interesante contrastar en una misma representación, la evolución que sigue la temperatura en el calentamiento frente a dicha evolución en la curva de enfriamiento.

Resalta en el gráfico como el tiempo invertido en incrementar un grado la temperatura es mucho mayor que el tiempo invertido en perderlo. El enfriamiento en un primer momento es mucho más rápido que el calentamiento. Este motivo implica el hecho de necesitar una ayuda adicional para mantener el calor una vez se retira de la cocina o se pone el Sol.

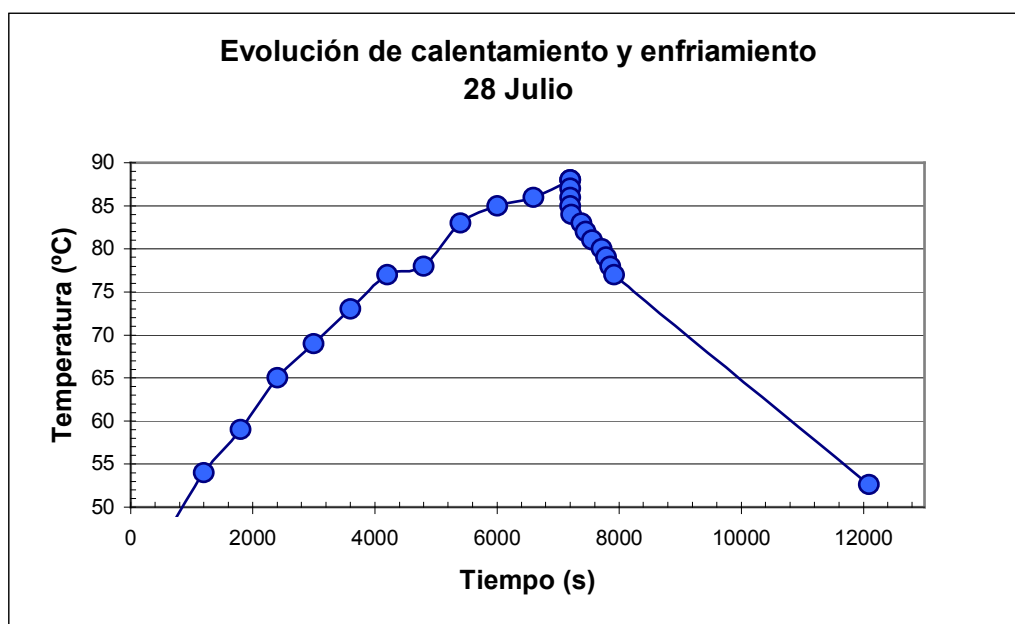


Figura 40. Evolución global de la temperatura.

## **6. CONCLUSIONES.**

La conclusión principal, y básica a su vez es que se ha conseguido caracterizar el comportamiento de la cocina Primrose siguiendo unas pautas de medición y desarrollando el estudio pertinente de las medidas recogidas en el ensayo de la cocina.

### **CARACTERÍSTICAS DE LA COCINA PRIMROSE**

Potencia  $\approx 80$  W

Temperatura de estancamiento  $\approx 86^{\circ}\text{C}$  con agua,  $110^{\circ}\text{C}$  con aceite

Rendimiento  $\approx 0,25$

Considerando todos los resultados obtenidos de los cálculos y de la observación, se puede finalizar corroborando que resulta muy evidente la influencia de las condiciones atmosféricas, afectando gravemente a la capacidad y la operatividad de la cocina que estamos caracterizando. En contraposición, siendo estas condiciones apropiadas, pueden cocinarse ciertos alimentos según algunos métodos de cocción.

Bien es cierto, que la experiencia ha demostrado que ésta cocina Primrose en cuestión, no sea del todo adecuada para freír o asar por las altas temperaturas requeridas para ello, al menos en la situación geográfica en la que se ha ensayado, sin embargo cualquier alimento puede ser cocido o hervido en ella. No obstante, considerando otra localización con mayor radiación o una meteorología más estable a lo largo del año, como sucede en muchos de los países en vías de desarrollo que se comentaron en el planteamiento inicial, quizá pudiera ser empleada para otros métodos de cocción que demanden elevadas temperaturas.

Por lo cual, se confirma la utilidad de la misma para llevar a cabo la alimentación de las comunidades que más lo necesitan, obviando la necesidad de recogida y quema de leña tan perjudicial para la salud de los que la emplean como para el medio ambiente, evitando desde la deforestación extrema, pasando por la contaminación que provoca la explotación de la materia prima, hasta el riesgo que estas personas corren cada día para poder alimentarse.

Todo ello unido a que, como ya sabemos pueden reducirse las enfermedades provocadas por la carencia de agua potable que aún existe en algunas partes del mundo, eliminando los agentes patógenos presentes en el agua por medio de su esterilización.



## *Trabajos futuros*

Gracias al ensayo realizado, se puede plantear como procedimiento interesante la mejora de la caracterización a partir de los conocimientos adquiridos en este estudio.

Este trabajo comienza con la toma de medidas en el período de verano, cuando las condiciones son adecuadas. A partir de los datos registrados se procede al análisis y estudio teórico de los resultados que se pueden obtener con las medidas recogidas. En este proceso, se descubren carencias una vez obtenidos resultados y analizada la influencia de todos los factores.

Conocido el comportamiento de la cocina, y los factores influyentes en ese comportamiento, se pueden mejorar las insuficiencias presentes en el ensayo. Apoyándose en la experiencia adquirida del mismo: ensayar únicamente en condiciones apropiadas, evitar condiciones adversas, y centrarse en puntos que presentan mayores carencias en este estudio. Esto sucede por ejemplo con el ensayo de enfriamiento. Cabe destacar, que en este estudio, y consecuencia de seguir la norma europea, sólo se recogieron datos de enfriamiento hasta los 80°C (como indica dicha norma), y se ha aproximado el resto. Por ello, el análisis del enfriamiento sería uno de los puntos clave a mejorar.

Resulta pues interesante un nuevo proceso de medición una vez conocidas las particularidades de la cocina, y las necesidades básicas para conseguir un estudio teórico-práctico que se ajuste a la realidad.

Relacionado con la mejora en el ensayo de caracterización, existe una propuesta para nuevas normas útiles para caracterizar cocinas solares, del Dr. Ashok Kundapur, International Alternate Energy Trust, Kalashree, India y del Dr. Sudhir C V., Department of Mechanical Engineering, Manipal Institute of Technology; presentado en la Conferencia Internacional de cocinas solares, en Granada España en Junio de 2007.

### PROPUESTA DE NUEVAS NORMAS

A la vista de los resultados obtenidos a partir del seguimiento de las normas existentes, resulta conveniente el desarrollo de una nueva norma que abarque en su proceso de ensayo no sólo el estudio de la capacidad global de la cocina, si no que abarque el estudio de otra serie de características importantes para el conocimiento, prueba y presentación de informes de la cocina a estudio.

- En primer lugar un ensayo de rendimiento térmico. Registro de las temperaturas.
- Obtención de la temperatura de estancamiento. El conocimiento de esta temperatura está directamente relacionado con el conocimiento de la capacidad de trabajo de la cocina
- Prueba de pérdida de calor. Es un resultado fácilmente entendible por el usuario y esclarecedor a cerca de la eficiencia de la cocina. Es conveniente expresarlo en porcentaje
- Estándar de tiempo de cocción o una prueba de máxima carga.
- Pruebas de la capacidad de conservación que presentan los componentes de la cocina, factor importante para el mantenimiento de la temperatura.
- Diagramas del rastro del rayo. Resulta importante para analizar el efecto de la reflexión de la radiación en las cocinas de panel o de concentración.
- Consideraciones ergonómicas: y facilidad de uso
- Coste. Resulta importante el modelo de cocina dada la variabilidad de precio según cada uno de los tipos.
- Hacer participa a un usuario activo de las observaciones y los ensayos. La opinión expresada de un usuario y la posibilidad de que sugiera mejoras en el diseño, agiliza el posterior desarrollo de la cocina.

[Referencia: <http://solcooker.tripod.com/solar11.htm>]

## MANTENIMIENTO DEL CALOR EN LA COMIDA

Otro factor de gran importancia en la cocina solar, es el mantenimiento de la temperatura mediante la conservación del calor. Para ello hasta hoy se utilizan recipientes como cestos o canastas fabricadas de materiales presentes en la zona, cubiertos con una manta que consiga mantener el calor por un tiempo mayor.

En relación con esta tarea existe la necesidad de mejorar en el futuro. Encontrar medios más fiables de conservar el calor. El siguiente paso es el desarrollo y estudio de cocinas con acumulación de calor que permitan mantener la comida caliente hasta la noche e incluso hasta la mañana siguiente. A este respecto se está estudiando ya el efecto que ejercen materiales de cambio de fase. Estos son concretamente parafinas que funden a 105°C y que se mantienen estables a esa temperatura, impidiendo la pérdida de calor y acumulando a su vez mucha energía. En el entorno de las cocinas solares, se emplean como ollas fabricadas con estos materiales, que contengan en su interior la olla en la cual hemos cocinado. El conjunto contenido en una caja que guarde el calor, o bien cubierto por mantas permite mantener el interior, y por tanto los alimentos cocinados a altas temperaturas.

## PROGRAMAS PARA LA ACEPTACIÓN Y UTILIZACIÓN

A parte del estudio experimental de las cocinas, es de gran importancia dar a conocer su utilidad y capacidad, para poder solventar los problemas que con ellas se pretende solventar. Para ello es imprescindible llevar a cabo programas que promuevan el conocimiento de esta nueva forma de cocinar, entre las comunidades de los países en desarrollo que más pueden beneficiarse de su existencia.

Más allá de los resultados obtenidos en Europa gracias a la coalición de diversas instituciones investigadoras que apoyan las cocinas solares (ECSCR, GTZ, BMBF)\*, en los países en vías de desarrollo sólo se han conseguido resultados modestos.

No se ha prestado demasiada atención al contexto social de necesidades de los usuarios potenciales. Por ello resulta imprescindible la consideración de esta sociedad en el diseño, desarrollo y condiciones propicias para el uso de las cocinas solares.

En lugares como Sudáfrica en 1996, se desarrolló un programa piloto coordinado por la GTZ y el Departamento de Minerales y Energía (DME). En el se llevó a cabo un ensayo de campo comparativo con varios modelos de cocinas solares.

Resultaría interesante continuar con una labor similar en estas comunidades a las que les resultaría tan beneficioso el conocimiento y la adquisición de las cocinas solares. En estas localizaciones, dadas las condiciones adversas, tanto económicas como culturales, no tienen la posibilidad de considerar una iniciación en esta nueva tecnología.

El programa partiría de la introducción de diversos modelos de cocinas, de forma que cada familia probara todos durante un periodo de tiempo, y fueran entrevistados para conocer sus impresiones. Tras este paso previo, se consigue, gracias al conocimiento y aceptación directos, introducir comercialmente los modelos de cocinas que hayan sido mejor considerados por los propios usuarios.

El proyecto similar a este realizado en Sudáfrica, arrojó unos resultados bastante prometedores. En primer lugar las cocinas fueron utilizadas, cuando fue necesario cocinar, el 40% del tiempo. De las familias que las emplearon, el 93% estuvieron satisfechas como los procesos de cocción solar. El ahorro energético de las familias fue en promedio de un 38%. Y como último logro, casi el 100% de las familias compraron una cocina a precio reducido.



Conocidos estos resultados se demuestra la gran importancia del conocimiento de las cocinas. Por ello es un trabajo importante la difusión y el desarrollo masivo en el futuro de estos programas de conocimiento. Ha de tenerse en consideración, los factores a los que se da importancia que indudablemente y como prioritario es el precio, así como la facilidad de uso, la utilidad según las necesidades del usuario, que sean productos duraderos y de calidad. A su vez, el marco político debe ser propicio para el éxito sostenible, debe favorecer las tecnologías más prometedoras, sin aspectos que resulten paralizantes.

*[Referencias: GTZ 1999 - DME / GTZ (1997) - ECSCR (1994) ]*

\* ECSCR: Comité Europeo para la Investigación de la Cocina Solar

GTZ: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (Sociedad alemana de cooperación técnica)

BMBF: Bundesministerium für Bildung und Forschung (Ministerio Federal de educación e investigación alemana)





## 7. ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO

- [1] Encyclopedia of Energy, Volume 5. 2004 Elsevier – Solar Cookers
- [2] American Society of Agricultural Engineers Standard ASAE S580
- [3] Basis for the Bureau of Indian Standards Testing Method
- [4] European Committee on Solar Cooking Research Testing Standard
- [5] <http://solcooker.tripod.com/solar11.htm>
- [6] Mullik, Thermal test procedures for box type Solar Cooker, Solar Energy
- [7] Funk Paul., Evaluating the international Standard procedure for testing solar cookers and reporting performance, Solar Energy
- [8] Antonio Lecuona, 2010. Fundamentos de cocinas solares
- [9] Seguir adelante con las cocinas solares - Aceptación e Introducción al Mercado (GTZ 1999) [www.gtz.de](http://www.gtz.de) (en Erarbeitung bei 02)
- [10] DME / GTZ (1997), Campo de Cocina Solar -.Prueba en África del Sur, Fase 1, Volumen 1, Informe Central, Johannesburg, Diciembre 1997
- [11] ECSCR (1994): Segundo Solar Test Cocina, Resumen de Resultados, segunda edición.

### INTRODUCCIÓN:

- [12] Universidad de Jaen - [www.ujaen.es](http://www.ujaen.es)
- [13] Instituto de energía solar de la Universidad Politécnica de Madrid - [www.ies.upm.es](http://www.ies.upm.es)
- [14] Perspectiva ambiental 25 Junio 2002 – Cocinas Solares
- [15] <http://www.galeon.com/energiasolar/>
- [16] <http://www.textoscientificos.com/energia/solar>
- [17] [http://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa\\_solar](http://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_solar)
- [18] <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia30/HTML/articulo08.htm>
- [19] Journal of Energy in Southern Africa • Vol 18 No 3 • August 2007
- [20] [www.elsevier.com/locate/solener](http://www.elsevier.com/locate/solener) - June/September 2007
- [21] [www.elsevier.com/locate/renene](http://www.elsevier.com/locate/renene) – June 2006
- [22] You tube - **Witness - Manda's Prize**



HISTORIA Y ESTADO DEL ARTE:

[23] Development and performance testing of solar cookers - C Z M Kimambo - Department of Energy, University of Dar es Salaam

[24] Encyclopedia of Energy, Volume 5. 2004 Elsevier – Solar Cookers

[25] <http://solarcooking.wikia.com/wiki>

[26] UNEP Collaborating Centre on Energy and Environment - Final Report 1 July 2001  
“Assessment of the commercialisation of selected sustainable energy technologies, products and services: solar cookers.” **Palmer Development Consulting**

[27] Second International Solar Cooker Test" of the ECSCR - Household Energy Programme of the Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ)

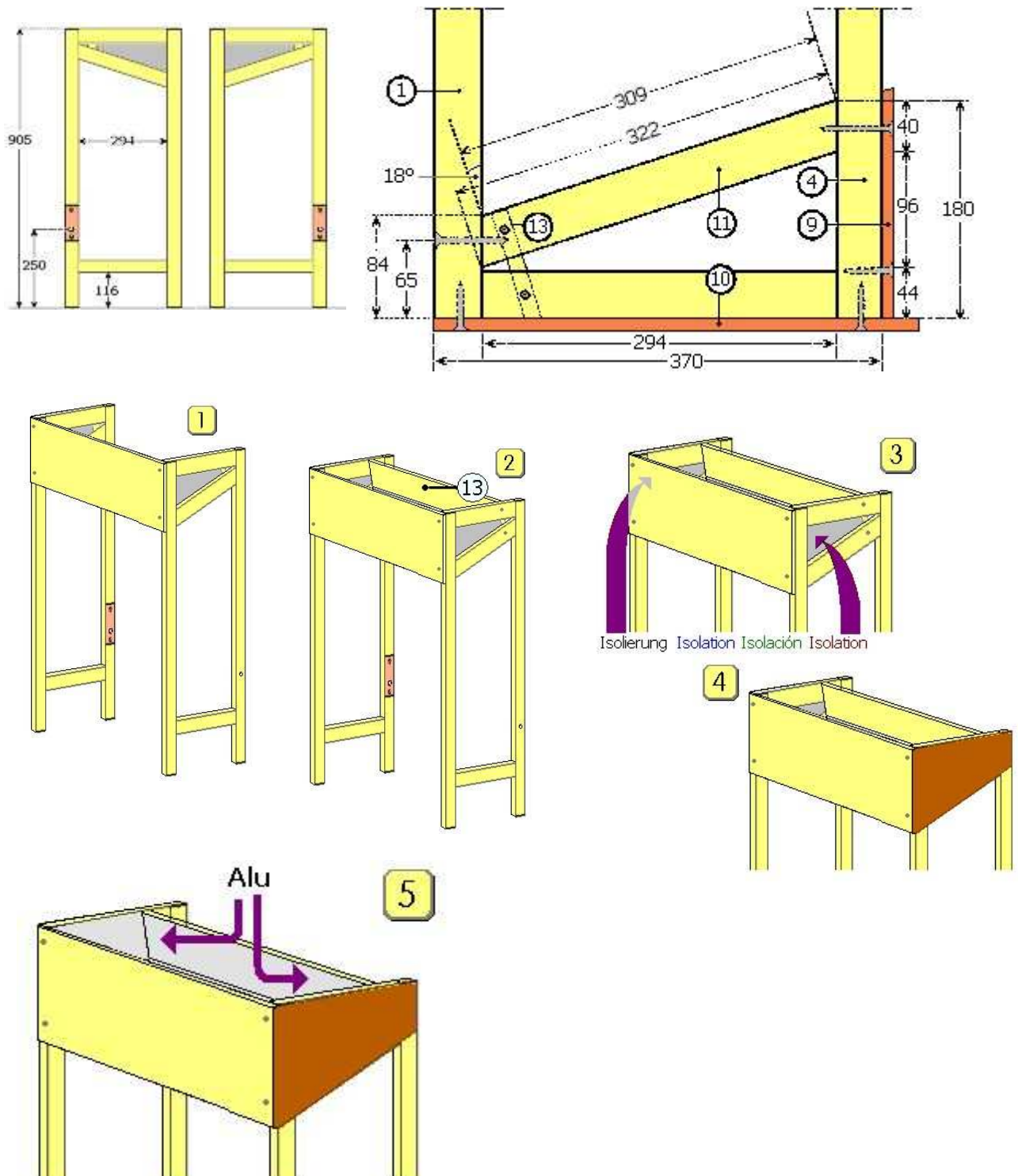
[28] Journal of Energy in Southern Africa • Vol 18 No 3 • August 2007

[29] Technology of Solar Cooking – EdPejack

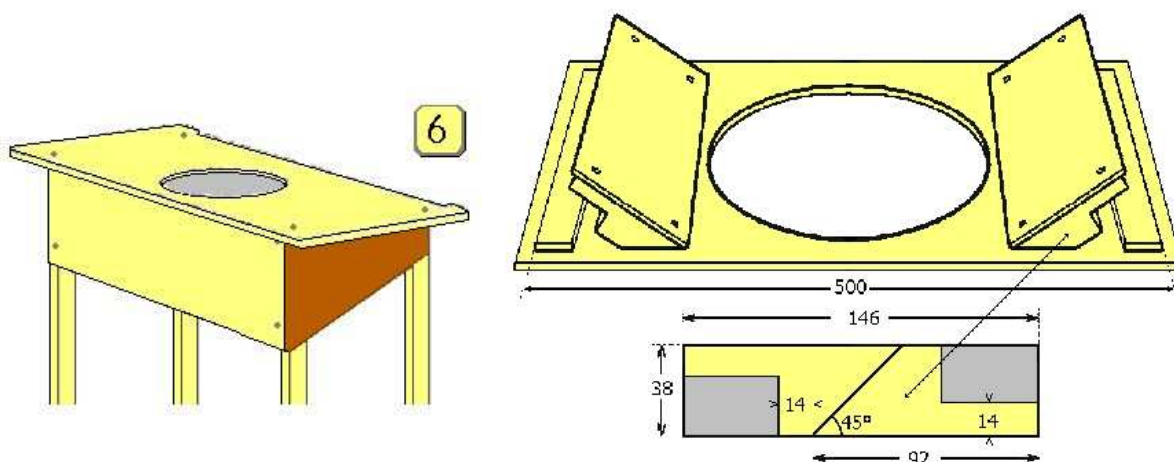
## 8. ANEXOS

### ANEXO 1: INSTRUCCIONES DE MONTAJE Y MANUAL DE USO

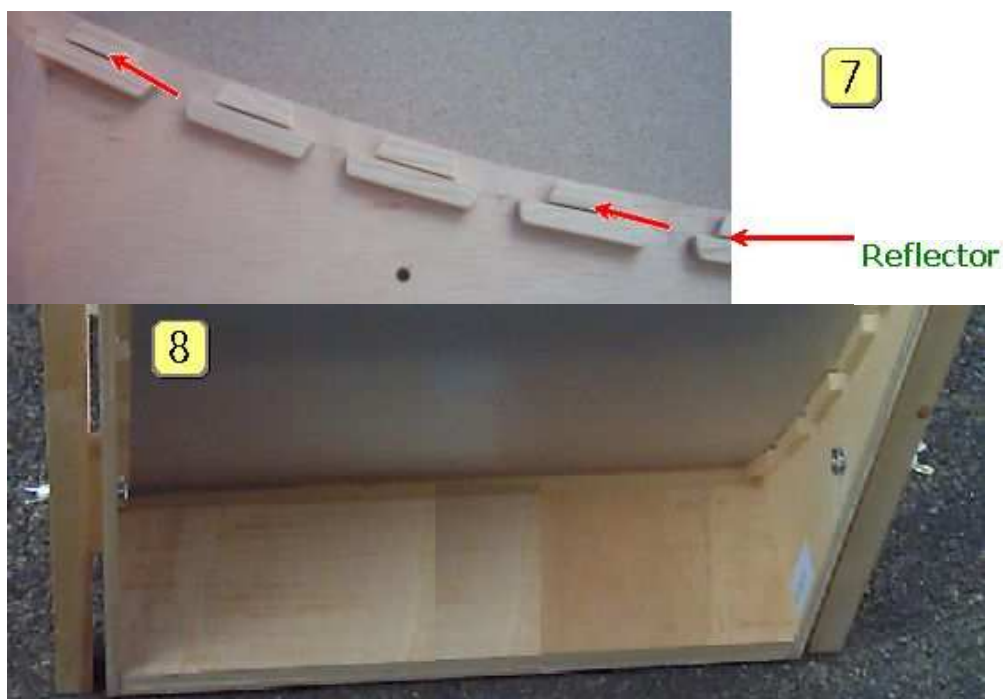
Juntar las piezas, en el orden de los dibujos.



La pared trasera (9) y la tabla de mesa (10) tienen que tener el papel de aluminio pegado, porque si no se calentarían demasiado. Para conseguir el mejor aislamiento recomendamos, pegar en la pared trasera (9) una o dos capas de cartón (El cartón no es parte del juego de montaje).



Nota para clientes que no han pedido ollas: La apertura para la olla tiene que ajustarse exactamente !!! a la olla. El espacio entre olla y tabla de mesa (10) tiene que ser alrededor menor que 1 mm, por que de otra manera escapa demasiado calor. Por esta razón usted tiene que serrar la apertura con mucho cuidado. Con los reflectores internos pasa lo mismo: Confecciónese dos reflectores internos, según la propuesta - ver dibujo-, que permiten la mejor radiación posible para la olla que van a utilizar.



Todas las piezas de madera o cartón, que se tiene que atornillar, deberían ser pegadas al mismo tiempo con cola de madera.

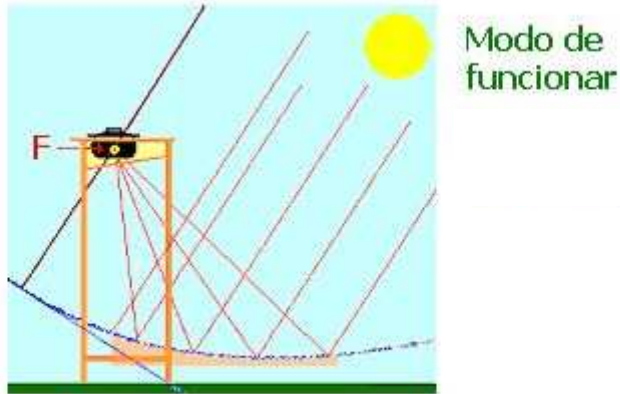
Quite primero el papel de protección de la ventana de policarbonato. Después atornille la ventana al chasis.

Rellene todos los huecos con cola para que el calor no pueda escapar. Mejor aún sería si usa silicona ( no acrílico) por que este material resiste mejor el calor.

Para asegurar que la tabla de mesa (10) no se dañe durante de mucho tiempo, píntela en la parte que da fuera con laca o barniz. Así resiste a las caídas de ollas y también a una ligera lluvia.

El reflector no se debe levantar o bajar demasiado fácilmente. Las dos M8 tornillos alados tienen que estar atornillados fuertemente, pero tampoco demasiado para evitar deformaciones del

reflector. Como medida sirve: El reflector tiene que ser ligeramente movable, pero tiene que ser tan fijo que no puede caer solo al suelo o ser movido por una ráfaga de viento.



Introducir o retirar la olla solamente debe realizarse con los reflectores cerrados. La olla o el recipiente para cocinar debe ser negro y tener tapa. Tenga cuidado no deslumbrarse o pillarse los dedos. Los ojos no deben estar de ninguna manera en el camino de los rayos. Use para remover la comida o para quitar la olla en todo caso agarraderas o guantes de cocina.

En caso de duda consulte el fabricante por escrito o por e-mail.

[Referencia: <http://www.mueller-solartechnik.com/manuals/primrose.htm>]

## **ANEXO 2: NORMA AMERICANA**

### **SOCIEDAD AMERICANA DE INGENIEROS AGRÓNOMOS. NORMA ASAE S580**

Este estándar fue desarrollado originalmente por el Dr. Paul Funk como un estándar de pruebas internacionales para cocinas solares. La necesidad de dicha norma fue reconocido y abordado en la Tercera Conferencia Mundial sobre la Cocina Solar, en enero de 1997 (Funk, 2000). El objetivo de esta norma era producir una medida sencilla, pero significativa y objetiva del desempeño de cocina que no fuera tan complicado como para que hacer las pruebas en las zonas menos desarrolladas resultara prohibitivo.

ASAE S580 monitoriza la temperatura media dentro de una olla de agua, mientras que la cocina opera bajo un conjunto de directrices indicadas en la norma para el seguimiento de procedimiento, la carga térmica, etc. Se realizan mediciones de temperatura del agua y se promedian en intervalos de 10 minutos. La temperatura ambiente y la irradiancia normal (flujo de energía solar por área) también son medidos y registrados, por lo menos tan a menudo como la temperatura de carga. En condiciones de fuerte viento, insolación baja, o baja temperatura ambiente, las pruebas no deben llevarse a cabo. La figura principal de mérito utilizada por ASAE S580 es la potencia de cocción. Se calcula mediante el siguiente procedimiento.

$$\dot{Q} = \frac{T_2 - T_1}{600} mc_p \quad (\text{Ecuación1})$$

Dónde:

$\dot{Q}$  = potencia (W)

$T_2$  = temperatura final del agua

$T_1$  = temperatura inicial del agua

$m$  = masa de agua (kg)

$c_p$  = capacidad calorífica (4186 kJ / kgK para el agua)

La ecuación 1 se divide por 600 para tener en cuenta el número de segundos en cada intervalo de 10 minutos.

$\dot{Q}$  se normaliza a una cifra de 700 W/m<sup>2</sup> a través de la siguiente ecuación.

$$\dot{Q}_{normalizada} = \dot{Q} \left( \frac{700}{I} \right) \quad (\text{Ecuación2})$$

Dónde:

$I$  = intervalo de insolación media (W/m<sup>2</sup>)

$\dot{Q}$  = potencia (W)

$\dot{Q}_{normalizada}$  = potencia de cocción normalizada

$\dot{Q}_{normalizada}$  se representa frente a  $\Delta T$  y se aproxima realizado una regresión lineal.

Para los procedimientos de presentación de informes estándar, se utiliza una diferencia de temperatura de 50 ° C (es decir, Tagua-Tambiente ~ 50 ° C) y la  $\dot{Q}_{normalizada}$  correspondiente se reporta como la "Potencia de la cocina"(ASAE, 2003).

Mientras ASAE S580 logra el objetivo de proporcionar un test sencillo para establecer una figura de mérito universal y entendible, la norma tiene carencias en otras áreas.





A pesar de que no se menciona como un objetivo, la norma no se ocupa de asuntos que no sean estrictamente el rendimiento de la cocina. La única cifra de mérito prácticamente carece de valor para la evaluación de por qué una olla logra un cierto rendimiento, ya que deja fuera cualquier medición directa de las pérdidas de calor. Por lo tanto, cualquier uso de la norma ASAE para analizar el rendimiento de una cocina, más allá de simplemente comparar su rendimiento con otra cocina sería muy difícil.

Desde una perspectiva cualitativa, ASAE S580 no se refiere a la facilidad de uso, seguridad o temas financieros asociados con las cocinas bajo prueba. Una vez más, esto nunca se supuso como objetivo de la norma, aunque debe tenerse en cuenta que esta información podría ser igualmente importante para cualquier persona interesada en la evaluación de cocina solar. No importa cómo de ejemplar sea el comportamiento térmico de una cocina, si cuesta miles de dólares y es imposible de adquirir por una persona de nivel económico medio, de esta manera, la utilidad verdadera de la cocina es muy dudosa.

### ANEXO 3: NORMA INDIA

#### BASES PARA LA OFICINA DE ESTÁNDARES INDIOS. MÉTODO DE PRUEBA

El segundo estándar de pruebas considerado se basa en procedimientos de ensayo térmico para cocinas solares tipo caja (*Thermal Test Procedures for Box-Type Solar Cookers*), por Mullick, 1987. Esta norma, presentada en un marco más técnico que ASAE S580, establece dos figuras de mérito, calculadas con el fin de ser lo más independientes posible de las condiciones ambientales (como la velocidad del viento, insolación, etc). Las dos figuras de mérito están dadas por las siguientes ecuaciones.

$$F_1 = \frac{T_s - T_a}{I_s} \quad (\text{Ecuación3})$$

Donde:

$T_s$ : Temperatura de estancamiento (stagnation) ( [K] )

$T_a$ : Temperatura ambiente ( [K] )

$I_s$ : Radiación a la temperatura de esta

$$F_2 = \frac{-F_1 \cdot (m \cdot C_p)_w}{A \cdot t} \cdot \ln \left[ \frac{1 - \frac{1}{F_1} \left( \frac{T_{w2} - T_a}{I} \right)}{1 - \frac{1}{F_1} \left( \frac{T_{w1} - T_a}{I} \right)} \right] \quad (\text{Ecuación4})$$

Donde:

$T_a$ : Temperatura ambiente ( [K] )

$m$ : masa de agua ( [kg] )

$C_p$ : calor específico del agua a presión constante ( [J/(kg K)] )

$T_{w1}$ : Temperatura del agua, valor al comienzo del calentamiento ( [K] )

$T_{w2}$ : Temperatura del agua, valor al final del calentamiento ( [K] )

$t$ : Tiempo ( [s] )

$A$ : Área de apertura de la cocina ( [m<sup>2</sup>] )

$I$ : Radiación en el intervalo de evaluación de la temperatura (1-2) ( [W/m<sup>2</sup>] )  
[En el calentamiento]

Estableciendo una temperatura de referencia, la solución de la ecuación4 para "t", dibuja una curva característica que describe, para un determinado conjunto de condiciones, el tiempo que tardará la cocina para llegar a la temperatura de referencia.

Desafortunadamente el estándar de Mullick, así como ASAE S580, no incluye los numerosos factores cualitativos que pueden ser igualmente importantes para evaluar el desempeño de una cocina solar y su viabilidad.



#### **ANEXO 4: NORMA EUROPEA**

##### **ESTÁNDAR DE ENSAYO DEL COMITÉ EUROPEO PARA LA INVESTIGACIÓN DE COCINAS SOLARES.**

- Se precalienta agua a 40°C y se coloca en una olla y se registra la temperatura durante 2 horas alrededor del mediodía solar (es decir, 11:00-13:00 horas solares)
- La cocina se fija hacia el sol y se deja. El tiempo que tarda el agua del interior en enfriar hasta 80°C se registra
- Se precalienta aceite a 40°C, se pone en la cocina de 11:00-13:00 y se registra la temperatura máxima alcanzada.
- Aceite caliente de la prueba anterior se deja enfriar en la olla retirada del sol. Se registra el tiempo necesario para enfriar el aceite a 100°C.
- Se realiza el paso 1 sin precalentamiento.
- Se quita la tapa de la olla y se recoge el tiempo que tarda el agua en enfriarse hasta los 80°C, con agitación ocasional.
- El agua precalentada a 40°C se calienta en la cocina con el sol en un ángulo bajo. La temperatura se registra como una función del tiempo. Esta medida tiene como finalidad poner a prueba el rendimiento de la cocina por la mañana y por la noche.



## **ANEXO 5: CÁLCULOS**

### **HOJAS DE CÁLCULO**

### **DATOS Y RESULTADOS**